

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉIA PEDROSO

ANÁLISE DA INCERTEZA DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS NA
ESTIMATIVA DA VAZÃO DE PROJETO EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS
PEQUENAS

CURITIBA

2019

ANDRÉIA PEDROSO

ANÁLISE DA INCERTEZA DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS NA
ESTIMATIVA DA VAZÃO DE PROJETO EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS
PEQUENAS

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Recursos Hídricos e Ambiental, no Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos
Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2019

Andréia Pedroso

Análise da incerteza de hidrogramas unitários sintéticos na estimativa da vazão de projeto em duas bacias hidrográficas pequenas

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P372a Pedroso, Andréia

Análise da incerteza de hidrogramas unitários sintéticos na estimativa da vazão de projeto em duas bacias hidrográficas pequenas [recurso eletrônico] / Andréia Pedroso – Curitiba, 2019.

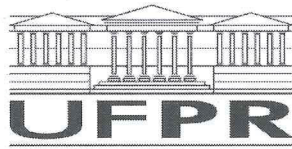
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich

1. Bacias hidrográficas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mannich, Michael. III. Título.

CDD: 551.483

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANDRÉIA PEDROSO** intitulada: **ANÁLISE DE INCERTEZAS DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO DE PROJETO EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS PEQUENAS**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua A PROVAÇÃO no rito de defesa.


A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


CURITIBA, 07 de Junho de 2019.


MICHAEL MANNICH

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL
Avaliador Interno (UFPR)


MINO VIANA SORRIBAS
Avaliador Externo (SIMEPAR)


IRANI DOS SANTOS
Avaliador Externo (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luimar Pedroso e Célia Naomi Pedroso, pelo apoio e compreensão incondicionais.

Ao Prof. Dr. Michael Mannich, pela credibilidade em meu trabalho, por guiar meus passos com admirável sabedoria e minúcia, e pela motivação e força que me fizeram seguir adiante nos momentos de dificuldade.

Aos meus amigos, que não desistiram de mim, apesar dos incontáveis "Não posso, tenho obrigações do mestrado" que disse a eles.

A todos aqueles que contribuíram com este trabalho, cada qual à sua maneira, em especial: Guilherme Piaie de Oliveira Palma, Kássia Regina Bazzo, Iverson Italo Siebert, Nicolás Lopardo, Fernando Helmuth Syring Marangon, Marcelo Ng Wei Ban Hung e Ticyana Moralez da Silva Novais.

À empresa RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda., pela flexibilização profissional que possibilitou a realização deste objetivo e pela autorização do uso de ferramentas concebidas no âmbito de seus projetos.

“O esforço e o acaso, tanto quanto o talento inato, são o que realmente importa. Enquanto nossa constituição genética está fora do nosso controle, o grau de esforço depende de nós mesmos. E os efeitos do acaso também podem ser controlados, na medida em que, dedicando-nos a tentativas repetidas, podemos aumentar nossa chance de êxito.”
(Leonard Mlodinow)

RESUMO

Os hidrogramas unitários sintéticos (HUS) são ferramentas de grande utilidade para a estimativa de vazões máximas em bacias hidrográficas desprovidas de registros históricos de medições. Entretanto, apesar da aplicação funcional, esses métodos possuem muitas incertezas e, dado o grau de empirismo e subjetividade envolvido, nem sempre produzem resultados compatíveis com a realidade. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar comparativamente a incerteza da aplicação dos métodos de HUS de Snyder, SCS e Clark, largamente utilizados, em relação aos hidrogramas observados, nas bacias hidrográficas das estações fluviométricas Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000), localizadas no estado do Paraná, consideradas pequenas do ponto de vista de área de drenagem. Inicialmente, foi realizada a consistência dos dados pluviométricos e fluviométricos utilizados, visando reduzir as incertezas nos dados de entrada, bem como nos hidrogramas observados. Para a análise comparativa entre os hidrogramas simulados e observados selecionou-se um total de 34 eventos chuva-vazão, com diferentes tempos de recorrência da chuva de projeto. Para a simulação de todos os HUS utilizou-se o *software* computacional HEC-HMS 4.2.1, considerando diferentes abordagens a partir de combinações entre os valores máximos e mínimos dos parâmetros de entrada, tanto da chuva efetiva quanto de cada modelo de HUS em particular. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que os três métodos analisados, via de regra, superestimaram as vazões de pico para ambas as bacias hidrográficas em estudo. O HUS do SCS produziu as maiores vazões de pico e, consequentemente, os maiores erros, enquanto o HUS de Snyder produziu os menores erros. Adicionalmente, os resultados obtidos a partir da chuva efetiva estimada para cada evento pelo método do coeficiente de escoamento direto, em detrimento do método do Número da Curva, mostrou que os HUS são fundamentalmente modelos conservadores, de modo que uma abordagem arrojada na estimativa dos parâmetros de entrada conduz a resultados com menores erros nas vazões de pico simuladas. As duas áreas de estudo consideradas apresentaram grande variabilidade entre si quanto aos erros nas vazões simuladas. De modo geral, a magnitude dos erros foi menor para a estação Porto Vitória (65365000) em comparação com aqueles obtidos para a estação Fazendinha (65010000). Esse fato pode estar relacionado à diferença entre as áreas de drenagem e características hidrológicas dos locais de estudo. Adicionalmente, não foi identificada tendência de melhoramento dos métodos de HUS com o aumento do tempo de recorrência da chuva de projeto.

Palavras-chaves: Incerteza. Hidrograma unitário sintético. Pequenas bacias hidrográficas.

ABSTRACT

Synthetic unit hydrographs (HUS) are useful tools for the estimation of maximum flows in watersheds lacking historical records of measurements. However, despite functional application, these methods have many uncertainties and, given the degree of empiricism and subjectivity involved, do not always produce results consistent with reality. In this context, the objective of this study was to comparatively analyze the uncertainty of the application of the Snyder, SCS and Clark HUS methods, widely used, in relation to the observed hydrograms, in the watersheds of the gage stations Fazendinha (65010000) and Porto Vitória (65365000), located in the state of Paraná, considered small from the point of view of drainage area. Initially, the pluviometric and fluviometric data were used to reduce the uncertainties in the input data, as well as in the hydrographs observed. For the comparative analysis between the simulated and observed hydrograms a total of 34 rainfall-runoff events were selected, with different return period of the design rainfall. For the simulation of all HUS, computational software HEC-HMS 4.2.1 was used, considering different approaches from combinations between the maximum and minimum values of the input parameters of both effective rainfall and each model of HUS in particular. From the results obtained, it was verified that the three methods analyzed, in general, overestimated the peak flows for both basins under study. SCS HUS produced the highest peak flows and consequently the largest errors while Snyder's HUS produced the smallest errors. In addition, the results obtained from the effective rainfall estimated for each event by the direct flow coefficient method, instead of the Curve Number method, showed that HUS are fundamentally conservative models, so that an audacious approach in estimating the parameters input leads to results with smaller errors in simulated peak flows. The two study areas considered presented great variability among them in terms of the errors in the simulated flows. In general, the magnitude of the errors was lower for Porto Vitória (65365000) compared to those obtained for Fazendinha (65010000). This fact may be related to the difference between the drainage areas and the hydrological characteristics of the study sites. In addition, no trend was identified for improvement of the HUS methods with the increase of the return period of the design rainfall.

Key-words: Uncertainty. Synthetic unit hydrograph. Small hydrographic basins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Premissas básicas do HU	23
FIGURA 2 – Principais parâmetros do HU	26
FIGURA 3 – Vantagens e limitações dos principais métodos de HUS	32
FIGURA 4 – Quantidade de estações fluviométricas por subgrupo de área de drenagem e disponibilidade de dados	36
FIGURA 5 – Localização das estações fluviométricas selecionadas	37
FIGURA 6 – Localização das estações pluviométricas selecionadas	38
FIGURA 7 – Mapa de uso do solo, adaptado de ITCG (2001)	42
FIGURA 8 – Curva de descarga consistida da estação Fazendinha (65010000)	52
FIGURA 9 – Distribuição dos desvios em relação ao tempo da curva de descarga consistida da estação Fazendinha (65010000)	52
FIGURA 10 – Curva de descarga consistida da estação Porto Vitória (65365000)	53
FIGURA 11 – Distribuição dos desvios em relação ao tempo da curva de descarga consistida da estação Porto Vitória (65365000)	53
FIGURA 12 – Curva uni-acumulativa da estação Fazendinha (2549017)	56
FIGURA 13 – Curva uni-acumulativa da estação Mananciais da Serra (2548041)	56
FIGURA 14 – Curva uni-acumulativa da estação Usina Bituruna (2651015)	57
FIGURA 15 – Curvas uni-acumulativas da estação Mananciais da Serra (2548041) excluindo-se os anos 1989 e 1990	58
FIGURA 16 – Regressão linear entre as vazões média diária e máxima a cada 15 minutos	60
FIGURA 17 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 2 anos da chuva de projeto	67
FIGURA 18 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 5 anos da chuva de projeto	67
FIGURA 19 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 10 anos da chuva de projeto	68
FIGURA 20 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 50 anos da chuva de projeto	68
FIGURA 21 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 2 anos da chuva de projeto	69
FIGURA 22 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 5 anos da chuva de projeto	69

FIGURA 23 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 10 anos da chuva de projeto	70
FIGURA 24 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 50 anos da chuva de projeto	70
FIGURA 25 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) na abordagem conservadora	73
FIGURA 26 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) na abordagem arrojada	73
FIGURA 27 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) na abordagem conservadora	74
FIGURA 28 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) na abordagem arrojada	74
FIGURA 29 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do CN	75
FIGURA 30 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do CN	76
FIGURA 31 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do CN	76
FIGURA 32 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do CN	77
FIGURA 33 – Relação entre a chuva efetiva calculada pelos métodos do CN e coeficiente de escoamento superficial e as vazões simuladas para a estação Fazendinha (65010000)	78
FIGURA 34 – Relação entre a chuva efetiva calculada pelos métodos do CN e coeficiente de escoamento superficial e as vazões simuladas para a estação Porto Vitória (65365000)	78
FIGURA 35 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do α	79

FIGURA 36 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do α	80
FIGURA 37 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do α	80
FIGURA 38 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do α	81
FIGURA A.1 – Polígonos de Thiessen com as estações pluviométricas com dados	90
FIGURA C.1 – Curvas altura-duração das chuvas de projeto para o local da estação fluviométrica Fazendinha (65010000)	92
FIGURA C.2 – Curvas altura-duração das chuvas de projeto para o local da estação fluviométrica Porto Vitória (65365000)	92
FIGURA E.1 – Fluviogramas médio diário e máximo a cada 15 minutos da estação fluviométrica Fazendinha (65010000)	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação dos métodos de HUS segundo Singh et al. (2014) .	27
TABELA 2 – Principais informações das estações fluviométricas selecionadas	37
TABELA 3 – Principais informações das estações pluviométricas selecionadas	38
TABELA 4 – Índice de escoamento de base para as séries de vazões das estações selecionadas	39
TABELA 5 – Definição do parâmetro CN	42
TABELA 6 – Retenção máxima potencial do solo e abstrações iniciais	42
TABELA 7 – Discretização temporal das chuvas de projeto	44
TABELA 8 – Características morfológicas das bacias hidrográficas das estações fluviométricas em estudo	44
TABELA 9 – Tempos de concentração estimados	47
TABELA 10 – Parâmetros da análise de incerteza	48
TABELA 11 – Discretização temporal das chuvas de projeto	48
TABELA 12 – Características da curva de descarga original das estações fluviométricas selecionadas	51
TABELA 13 – Desvios médios entre as medições e as vazões calculadas pelas curvas de descarga consistidas	54
TABELA 14 – Análise das cotas brutas e consistidas	55
TABELA 15 – Informações hidrológicas das séries de vazões determinadas para as estações fluviométricas em estudo	59
TABELA 16 – Comparação entre as vazões média diária e máxima a cada 15 minutos	60
TABELA 17 – Eventos de chuva e vazão selecionados	63
TABELA 18 – Agrupamento dos eventos selecionados conforme o tempo de recorrência	64
TABELA F.1 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS de Snyder	100
TABELA F.2 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS do SCS	100
TABELA F.3 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS de Clark	101

TABELA F.4 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS de Snyder	101
TABELA F.5 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS do SCS	102
TABELA F.6 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS de Clark	102

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas

BFlow *Baseflow Filter Program*

CN Número da Curva

HU Hidrograma unitário

HUI Hidrograma unitário instantâneo

HUS Hidrograma unitário sintético

HUT Hidrograma unitário triangular

INPE Instituto de Pesquisas Espaciais

MDE Modelo digital de elevação

PUB *Predictions in Ungauged Basins*

SCS *Soil Conservation Service*

SRTM *Shuttle Radar Topographic Mission*

SiADH Sistema para Análise de Dados Hidrológicos

USACE *US Army Corps of Engineers*

USGS *United States Geological Survey*

LISTA DE SÍMBOLOS

CN	Parâmetro do método de chuva efetiva do Número da Curva
α	Coeficiente de escoamento direto
BFI	Índice de escoamento de base
P	Chuva total
P_e	Chuva efetiva
I_a	Abstrações iniciais
S	Retenção máxima potencial do solo
V	Volume total precipitado
V_e	Volume efetivo ou volume escoado
a_i, b	Coeficientes de ajuste das curvas altura-duração
A	Área de drenagem
Q_p	Vazão de pico
t_p	Tempo de retardo
t_a	Tempo de ascensão
t_b	Tempo de base
t_c	Tempo de concentração
C_t, C_p	Coeficientes do HUS de Snyder
L	Comprimento do curso d'água principal
L_c	Distância da foz até o centro de gravidade da bacia hidrográfica
W_{50}	Largura do HUS de Snyder a 50% do pico
W_{75}	Largura do HUS de Snyder a 75% do pico
D	Duração da chuva unitária
S_0	Declividade
Q_i	i-ésima ordenada do HUS de Clark

A_i	i-ésima ordenada do diagrama tempo-área do HUS de Clark
C_1, C_2	Coeficientes do HUS de Clark
Δt	Intervalo de tempo
K	Coeficiente de armazenamento de um reservatório linear
Q	Vazão
h	Cota
h_0, n	Parâmetros da curva de descarga na forma de equação exponencial
N	Número de anos na série de dados
F	Frequência de ocorrência
M	Ordem de um valor igualado ou superado dentro da série de dados
TR	Tempo de recorrência
Q_{sim}	Vazão simulada
Q_{obs}	Vazão observada
Pe_{sim}	Chuva efetiva simulada pelo método do CN
Pe_{calc}	Chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	CONCEITO DE HIDROGRAMA UNITÁRIO	22
2.2	SISTEMÁTICA DE DETERMINAÇÃO DE HUS	23
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS HUS	26
2.4	ESTUDOS APLICADOS COM HUS	29
2.5	SÍNTESE E PANORAMA DOS MÉTODOS DE HUS	31
2.6	INCERTEZA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA CHUVA-VAZÃO	32
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	35
3.1	SELEÇÃO DE DADOS E ÁREA DE ESTUDO	35
3.2	SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE	39
3.3	DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA	40
3.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	44
3.5	DETERMINAÇÃO DOS HUS	45
3.5.1	HUS de Snyder	45
3.5.2	HUS do SCS	45
3.5.3	HUS de Clark	47
3.6	CONFIGURAÇÕES DOS DADOS DE ENTRADA	47
4	CONSISTÊNCIA DOS DADOS HIDROLÓGICOS	49
4.1	DADOS FLUVIOMÉTRICOS	49
4.1.1	Medições de Descarga	49
4.1.2	Curva de Descarga	50
4.1.3	Cotas	54
4.2	DADOS PLUVIOMÉTRICOS	55
4.3	DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE VAZÃO	58
4.4	DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE CHUVA	61
4.5	SELEÇÃO DOS EVENTOS DE CHUVA E VAZÃO	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66

5.1	COMPARAÇÃO DOS ERROS E INCERTEZAS NAS VAZÕES DE PICO DOS HIDROGRAMAS POR MÉTODO DE HUS	66
5.2	ADEQUAÇÃO DOS MÉTODOS DE HUS POR TEMPO DE RECORRÊNCIA	71
5.3	INCERTEZA COM A CHUVA EFETIVA CALCULADA PELO COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DIRETO	77
6	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	89
APÊNDICE A	POLÍGONOS DE THIESSEN	90
APÊNDICE B	EXEMPLOS DE FLUVIOGRAMAS DA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE	91
APÊNDICE C	CURVAS ALTURA-DURAÇÃO DAS CHUVAS DE PROJETO	92
APÊNDICE D	FLUVIOGRAMAS MÉDIO DIÁRIO E MÁXIMO A CADA 15 MINUTOS	93
APÊNDICE E	EVENTOS CHUVA-VAZÃO SELECIONADOS	94
APÊNDICE F	VAZÕES DE PICO OBSERVADAS, VAZÕES DE PICO SIMULADAS, RELAÇÃO Q_{sim}/Q_{obs} POR ESTAÇÃO E MÉTODO DE HUS	100

1 INTRODUÇÃO

“We forget that the water cycle and the life cycle are one.”

Jacques-Yves Cousteau (s/d)

Medidas, estimativas e modelagem da vazão de um rio são princípios fundamentais para a gestão dos recursos hídricos, bem como para análises técnicas e científicas no projeto de estruturas hidráulicas, predição de respostas eco-hidrológicas e estudos de inundação. Dentre as vazões características necessárias para os projetos de recursos hídricos, destaca-se a importância da determinação de vazões máximas associadas a riscos, segurança de instalações e otimização de investimentos. A adequada estimativa da vazão máxima de referência é um elemento fundamental para o êxito de projetos.

Segundo Tucci (1998), devido aos altos custos de implantação, dificilmente uma rede hidrometeorológica cobrirá todos os locais necessários ou possuirá registros históricos suficientes para subsidiar análises estatísticas de vazões máximas. No Brasil, o panorama da rede hidrometeorológica indica a existência de um grande número de estações de monitoramento, as quais, no entanto, não estão homogeneamente distribuídas. As maiores densidades de estações estão concentradas nas regiões hidrográficas do Atlântico Sudeste, Atlântico Nordeste Oriental e Atlântico Sul, com as densidades variando entre 250 a 500 km² de área territorial para cada estação fluviométrica (ANA, 2013).

Além disso, a condição de ausência de registros históricos é especialmente observada em bacias hidrográficas com áreas de drenagem reduzidas, menos viadas para o aproveitamento hídrico e para as quais os investimentos são menos direcionados. Usualmente, parte-se da premissa que os custos de medição podem ser superiores aos custos decorrentes do superdimensionamento dos projetos de infraestrutura associados.

Para preencher essa lacuna, as vazões máximas podem ser estimadas a partir de modelos hidrológicos de transformação de eventos temporais de chuva (hietograma) em vazão (hidrograma). Dividindo-se as ordenadas do hidrograma pela chuva efetiva, parcela essa que produz escoamento direto, obtém-se um hidrograma unitário (HU), que pode ser aplicado a outras chuvas efetivas de mesma duração (BRAS, 1990).

O método do HU foi apresentado primeiramente por Sherman, em 1932, ao observar, na análise de um grande número de eventos, certa regularidade nos hidrogramas de cheias e traduzir, por meio de equações empíricas, o comportamento do escoamento direto resultante de determinada chuva (PINTO et al., 1976).

Assim, a determinação do HU depende, fundamentalmente, da disponibilidade de registros de vazões. Para expandir sua aplicação a áreas com ausência desses dados foram desenvolvidas técnicas para relacionar as características geométricas do hidrograma a características físicas das bacias hidrográficas. De acordo com Bras (1990), isso permitiu que, uma vez conhecidos esses parâmetros, curvas com volume unitário pudessem ser traçadas, representando uma aproximação aceitável da função-resposta do sistema. Diante dessa possibilidade e da frequente necessidade de obtenção de informações de vazões em rios desprovidos de estações hidrométricas, surgiu o estudo e o desenvolvimento de métodos para a obtenção do chamado hidrograma unitário sintético (HUS), independente da existência de dados de vazões, baseado nas relações geométricas dos hidrogramas e nas principais características das bacias hidrográficas (PINTO et al., 1976).

O primeiro modelo de HUS foi apresentado por Snyder, em 1938. Posteriormente, o método foi modificado e aperfeiçoado por diversos outros autores, porém mantendo a ideia fundamental de se estabelecer relações entre os parâmetros do hidrograma e as características das bacias hidrográficas (HOFFMEISTER; WEISMAN, 1977). Dentre os demais métodos existentes, podem ser citados o de Clark, Taylor e Schwarz, Commons, *Soil Conservation Service* (SCS), Dooge e Nash.

Por se tratarem de métodos simples e práticos, os HUS passaram a ser amplamente utilizados na realização de estudos hidrológicos (SILVEIRA, 2016). Por outro lado, segundo Hrachowitz et al. (2013) os HUS vêm se mostrando inadequados para a predição hidrológica em bacias hidrográficas sem monitoramento, em especial por possuírem muitas incertezas.

No que tange às incertezas, na modelagem chuva-vazão os componentes principais de incerteza se referem aos erros introduzidos a partir dos dados de entrada e aos erros dos modelos propriamente ditos quando da representação dos processos físicos (HRACHOWITZ et al., 2013; WAGENER et al., 2004). As incertezas nos dados de entrada podem ser reduzidas, mediante uma análise de consistência criteriosa dos mesmos. Já as incertezas dos parâmetros e das inadequações do modelo devem ser conhecidas.

Com relação à aplicação dos HUS no Brasil, conforme Cunha et al. (2015), tem sido constatada a tendência de superestimação, além das vazões de pico, do volume escoado, principalmente para eventos de maiores magnitudes, levando ao superdimensionamento de projetos de recursos hídricos, não condizentes com a escala das bacias hidrográficas e com as observações de enchentes locais. Adicionalmente, Silveira (2016) destaca a necessidade de maior cautela ao se aplicar os modelos de HUS definidos empiricamente, cujos parâmetros variam dentro de uma grande faixa de valores e os resultados são sensíveis a pequenas variações.

À luz desses e de outros estudos analisados em diferentes locais (HOFFMEISTER; WEISMAN, 1977; TUCCI, 1998; SINGH et al., 2014; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015; THORVAT; PATEL, 2016), observa-se que a utilização dos HUS expandiu a possibilidade de obtenção de estimativas de vazão em bacias hidrográficas desprovidas de monitoramento. No entanto, apesar da funcionalidade dessa ferramenta, sua aplicação, em um contexto geral, ainda apresenta grandes deficiências, dentre as quais destaca-se a usual superestimação das vazões de pico.

Ainda que os resultados estejam a favor da segurança, em se tratando de bacias hidrográficas pequenas, cujos projetos relacionados aos recursos hídricos são, compativelmente, de pequeno porte, o superdimensionamento das estruturas pode inviabilizar as obras ou instalações projetadas. De acordo com Bhunya et al. (2011), a vantagem obtida pela simplicidade da sua utilização se contrapõe às incertezas relacionadas aos resultados obtidos, tornando questionáveis a aplicabilidade e aceitabilidade desses métodos na prática em projetos de engenharia.

Na busca por soluções para os reveses observados, pregressa e constantemente, as pesquisas realizadas pela *International Association of Hydrological Sciences* no plano científico Predições em Bacias sem Dados (PUB, acrônimo em inglês de *Predictions in Ungauged Basins*) resultaram em avanços para a hidrologia como ciência. No entanto, embora tenha havido também progressos na transferência dos resultados científicos para a prática, ainda foram considerados necessários esforços para a obtenção de modelos robustos e confiáveis para a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas desprovidas de monitoramento, bem como para o aprimoramento daqueles existentes (HRACHOWITZ et al., 2013). Outrossim, a necessidade e os benefícios da hidrologia comparativa para se obter uma melhor compreensão dos processos hidrológicos e uma melhoria de resultados foram reconhecidos, tornando essa abordagem uma técnica profícua a ser considerada.

Portanto, frente às diversas propostas de HUS e limitações desses, o conhecimento e a análise comparativa da incerteza entre diferentes métodos de HUS se torna importante no fornecimento de subsídios para a determinação da sua adequabilidade na modelagem hidrológica da região de interesse. Caso contrário, a insuficiência de confiabilidade continuará a prejudicar a gestão de recursos hídricos, em especial o desenvolvimento de projetos e estratégias eficazes de mitigação de eventos hidrológicos extremos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar comparativamente a incerteza da aplicação de três métodos de HUS ainda largamente utilizados, sendo eles Snyder, SCS e Clark, em relação aos hidrogramas observados, em duas bacias hidrográficas localizadas no estado do Paraná, consideradas pequenas do ponto de vista de área de drenagem.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- (a) Reduzir os erros e as incertezas oriundos dos dados de entrada e para comparação, por meio de análise de consistência hidrológica dos dados pluviométricos e fluviométricos.
- (b) Comparar os erros e incertezas nas vazões de pico e nos principais atributos dos hidrogramas observados e calculados pelos diferentes métodos de HUS.
- (c) Analisar a adequação dos métodos de HUS de acordo com faixas de magnitudes dos eventos observados, por meio do tempo de recorrência (TR) da chuva.
- (d) Avaliar a incerteza inerente aos modelos de HUS utilizando como dado de entrada a chuva efetiva calculada com base no coeficiente de escoamento direto.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi organizada em seis capítulos, incluindo a INTRODUÇÃO como o primeiro. O segundo capítulo (FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA) traz os princípios do desenvolvimento dos HUS e um panorama geral de suas aplicações. O terceiro capítulo (PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS) apresenta a área de estudo, as etapas de obtenção dos dados de entrada para aplicação dos HUS e as formulações dos métodos. O quarto capítulo (CONSISTÊNCIA DOS DADOS HIDROLÓGICOS) contempla os resultados da análise de consistência dos dados de entrada, cuja etapa é fundamental e preliminar para a avaliação de processos hidrológicos. Adicionalmente, são apresentados os eventos chuva-vazão selecionados para a análise. Na sequência, o Capítulo 5 (RESULTADOS E DISCUSSÕES) apresenta o corpo geral dos resultados e discussões da aplicação dos HUS e suas incertezas. Por fim, o Capítulo 6 (CONCLUSÕES) evidencia as conclusões desta pesquisa e apresenta, de forma sintética, proposições de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“TUnit hydrograph is iconic in hydrology and deserves further mention here because recent years have seen significant advances in this application.”

Littlewood et al. (2003)

Este capítulo apresenta o conceito de HU e suas classificações quanto às suas características. Adicionalmente, destaca um panorama da aplicação dos métodos e as incertezas associadas.

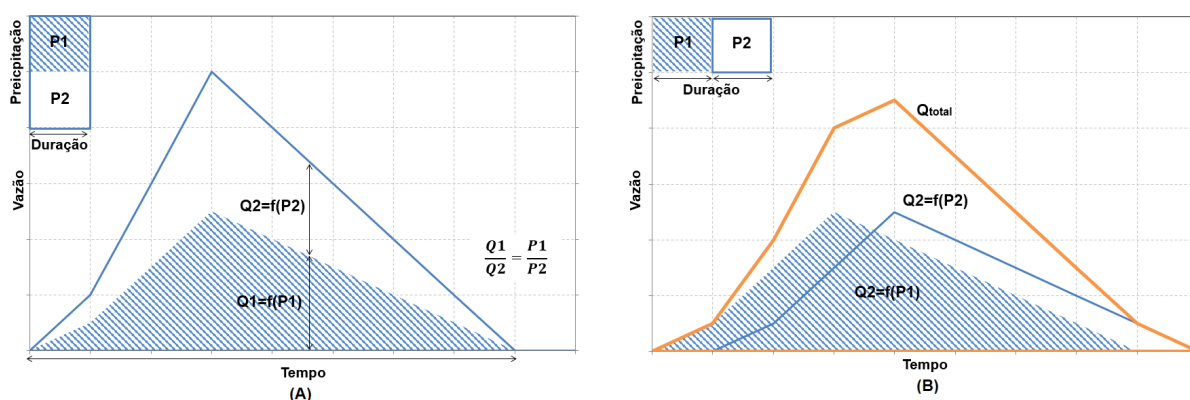
2.1 CONCEITO DE HIDROGRAMA UNITÁRIO

Para representar e melhor compreender o comportamento dos processos hidrológicos nas bacias hidrográficas foram desenvolvidos modelos. Devido ao grande número de fenômenos naturais envolvidos, bem como à dinâmica de alteração das características das bacias hidrográficas por ações antrópicas e mudanças climáticas, uma das principais aplicações dos modelos hidrológicos se refere ao prognóstico da resposta do sistema a diferentes entradas (TUCCI, 1998).

Nesse contexto, a necessidade de se realizar estudos hidrológicos para situações fisicamente semelhantes, mas a partir de diferentes condições, torna conveniente a utilização do HU - uma função-resposta de um sistema hidrológico linear (CHOW et al., 1988). Por efeito da definição como o hidrograma de escoamento direto resultante de uma unidade de altura de chuva efetiva de dada duração (VIESSMAN JUNIOR; LEWIS, 1997), considera-se que o HU é uma constante da bacia hidrográfica, refletindo suas características de escoamento (PINTO et al., 1976). Assim, faz-se possível sua aplicação a diversas chuvas efetivas para o estudo das vazões associadas.

A aplicação de qualquer modelo de HU está sujeita a três premissas básicas (FIGURA 1). Primeiramente, considera-se que chuvas de mesma duração e diferentes intensidades originam hidrogramas com durações iguais dos escoamentos e ordenadas proporcionais aos volumes totais escoados. Além disso, assume-se que a chuva é uniformemente distribuída no tempo e espaço e independente das precipitações anteriores. Por fim, o hidrograma total é obtido pela soma dos HU deslocados no tempo. Cabe ressaltar que, conforme Bras (1990), essas premissas limitam a aplicação da técnica a áreas relativamente pequenas.

FIGURA 1 – Premissas básicas do HU. Em (A) ilustra-se: i) constância da duração do escoamento e ii) proporcionalidade do HU. Em (B), tem-se: iii) superposição do HU.



NOTA: $P1$ e $P2$ - blocos de chuva; $Q1$ e $Q2$ - hidrogramas resultantes das chuvas $P1$ e $P2$, respectivamente

Contudo, a determinação do HU depende da existência de dados hidrológicos nos locais de interesse, o que nem sempre ocorre. Para expandir sua aplicação a áreas com ausência de dados foram desenvolvidos os hidrogramas unitários sintéticos (HUS), cuja essência segue os mesmos conceitos teóricos do HU (HOFFMEISTER; WEISMAN, 1977).

2.2 SISTEMÁTICA DE DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS

Apesar de passar por diversas modificações ao longo do tempo desde a sua concepção, os estudos de HUS obedecem à mesma sistemática de desenvolvimento (BRAS, 1990; PINTO et al., 1976):

- (i) Seleção de eventos bem definidos, em termos de ascensão, pico e recessão, e isolados, em cujos períodos próximos, precedentes e posteriores, outras precipitações não tenham gerado um hidrograma de cheia.
- (ii) Separação do escoamento de base.
- (iii) Definição da chuva efetiva.
- (iv) Seleção de pares chuva-vazão de igual duração da chuva efetiva.
- (v) Definição quantitativa das características físicas da bacia hidrográfica a serem consideradas.
- (vi) Correlação entre as características físicas e o hidrograma de cheia.

- (vii) Representação gráfica ou matemática das correlações mais significativas, permitindo sua utilização para a predição do hidrograma unitário.

Segundo Tucci (2003), a seleção dos eventos para a determinação do HU deve ser realizada considerando a magnitude e a frequência das cheias que se pretende representar. A utilização de eventos discrepantes pode introduzir erros no hidrograma médio obtido.

Tendo em vista que o método do HU se baseia nas propriedades do hidrograma de escoamento direto, correspondente à soma do escoamento superficial e intermediário, que ocorre nas camadas subsuperficiais mais rasas do solo, há a necessidade de separá-lo do escoamento de base, componente oriundo do armazenamento dos aquíferos (ESLMIAN, 2014). Raudkivi (1979) apresenta diversos métodos para a separação do escoamento. Entretanto, também demonstra que, em geral, como o escoamento de base possui uma pequena contribuição na vazão de pico do hidrograma, o erro introduzido pela separação, se incorreta, é pequeno. Nessa mesma compreensão, Pinto et al. (1976) ressaltam a dificuldade existente em se conseguir resultados precisos nessa estimativa e afirmam que a pequena parcela representada pelo escoamento de base nos eventos de cheia permite a adoção de processos mais rápidos e simples para aplicações práticas.

Conforme a pesquisa realizada por Souza (2015), a separação do escoamento pode ser realizada satisfatoriamente com a aplicação da ferramenta BFlow (*Baseflow Filter Program*). Para realizar a separação do escoamento, o BFlow utiliza o método do filtro digital recursivo, em que o filtro passa três vezes ao longo do fluviograma, resultando, em geral, em uma diminuição percentual do escoamento de base, em relação ao escoamento total, a cada passagem (ARNOLD; ALLEN, 1999). Esse processo permite o ajuste do método para aproximar os resultados com maior acurácia às condições locais. Contudo, na ausência do conhecimento das condições locais, Arnold et al. (1995) recomendam a utilização da primeira passagem do filtro.

Da mesma maneira que a separação do escoamento, a estimativa da chuva efetiva pode ser complexa. Um dos métodos de estimativa da chuva efetiva mais difundido é o do Número da Curva (CN) do SCS (USDA, 1986). Esse método considera que a chuva efetiva é calculada em função das perdas iniciais, fixadas em 20% da retenção máxima potencial do solo. Esta, por sua vez, está relacionada ao tipo e uso do solo e condições de umidade através do parâmetro *CN*. Os valores de *CN* foram tabelados por USDA (1986), podendo ser encontrados também de maneira sumária na obra de Tucci (2010).

Considerando que a chuva efetiva depende de fatores como interceptação, infiltração, sazonalidade e condição meteorológica antecedente, os quais variam am-

plamente, Raudkivi (1979) sugere a determinação do coeficiente de escoamento direto, denominado índice α . O coeficiente de escoamento direto relaciona o volume escoado e o volume total precipitado, com base em registros de monitoramento de chuva e vazão em bacias hidrográficas. Nessa mesma compreensão, Barbosa e Fill (2011), ao comparar a determinação de chuvas efetivas pelos métodos CN do SCS, coeficiente de escoamento e curvas de infiltração, constataram que a utilização do coeficiente de escoamento conduziu a resultados de chuva efetiva mais coerentes para cheias de pequena magnitude.

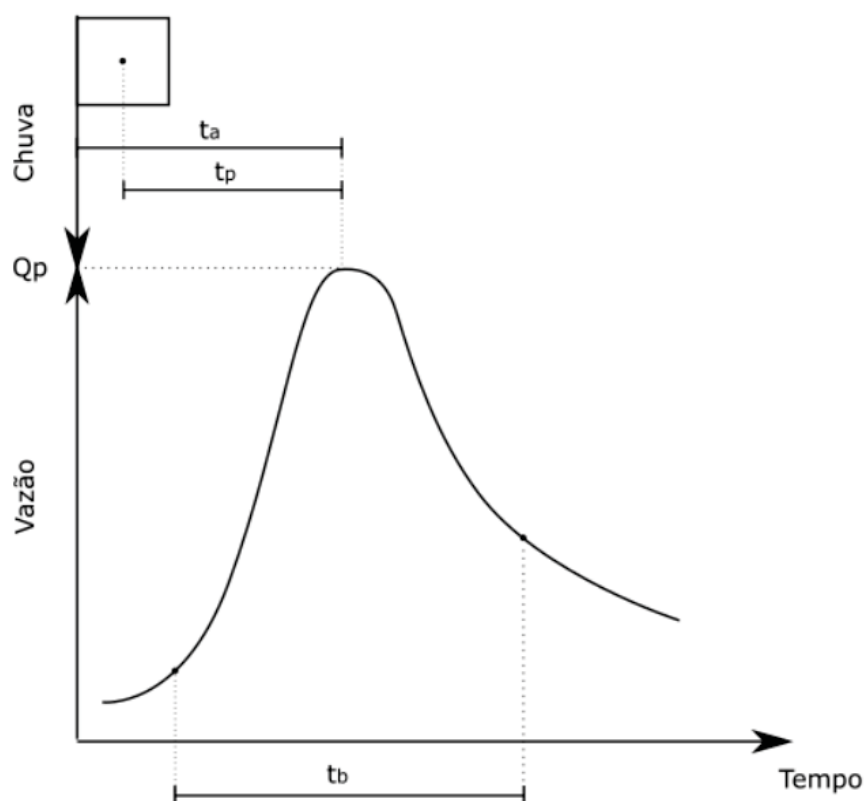
A forma final do hidrograma e o comportamento do escoamento são influenciados, em maior ou menor grau, pelas características físicas das bacias hidrográficas. Dentre essas, pode-se citar: geometria, área de drenagem, declividade, rugosidade do canal e densidade de drenagem da rede. Adicionalmente, outros fatores físicos da região que influenciam são o recobrimento vegetal, o tipo de solo e a capacidade de infiltração (BRAS, 1990; PINTO et al., 1976).

Os efeitos das características físicas das bacias hidrográficas no escoamento são, segundo Raudkivi (1979), evidentes e, em conjunto, levam à sua classificação em bacias hidrográficas hidrologicamente pequenas ou grandes. Nas bacias hidrográficas pequenas predomina o escoamento direto. Logo, características como uso do solo e declividade possuem forte influência na configuração do hidrograma. Além disso, tais bacias são bastante sensíveis à intensidade da chuva, respondendo rapidamente, pois os efeitos de armazenamento são pequenos. Em termos de área de drenagem, esta pode alcançar até cerca de 250 km².

Por fim, os procedimentos de obtenção de HUS resultam em equações matemáticas cujas variáveis estão relacionadas às características das bacias hidrográficas. As equações representam pontos do hidrograma, a partir dos quais uma curva deve ser traçada, de modo que a área sob essa curva seja aproximadamente igual ao volume unitário de escoamento direto, resultante da chuva efetiva unitária sobre a bacia hidrográfica.

Alguns parâmetros fundamentais para a determinação do hidrograma são a vazão de pico (Q_p), tempo de retardo (t_p), tempo de ascensão (t_a) e tempo de base (t_b) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). A FIGURA 2 ilustra tais parâmetros.

FIGURA 2 – Principais parâmetros do HU



FONTE: Adaptado de Collischonn e Dornelles (2013)

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS

O primeiro modelo de HUS foi desenvolvido por Snyder, em 1938, passando por diversas modificações ao longo do tempo. Contudo, segundo Singh et al. (2014), os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas sem dados de monitoramento passaram a receber maior consideração aproximadamente a partir da década de 1990.

A maioria dos métodos desenvolvidos são baseados em análises de dados de um grande número de eventos e bacias hidrográficas, diferindo em termos das relações estabelecidas e dos parâmetros adotados (BRAS, 1990; SINGH et al., 2014). Assim, os HUS podem ser agrupados e classificados de acordo com o método de obtenção das relações matemáticas e parâmetros.

Hoffmeister e Weisman (1977) separaram os métodos de HUS em dois grupos: empíricos e adimensionais. Os hidrogramas resultantes de equações empíricas relacionam as propriedades do hidrograma às características morfométricas das bacias em que os modelos foram gerados. Nesse grupo, destacam-se os métodos de Snyder e Commons. Para os modelos ditos adimensionais, o hidrograma é resumido a uma curva padrão com coordenadas ou parâmetros adimensionais, eliminando os efeitos do

tamanho e forma da bacia hidrográfica. O hidrograma unitário triangular (HUT) do SCS é o mais conhecido desse tipo; outros hidrogramas adimensionais foram desenvolvidos, porém ainda apresentavam notável correlação com a forma e tamanho das bacias.

Já Chow et al. (1988) expandiram a classificação dos HUS em três tipos: a) aqueles que relacionam as características hidrológicas às características da bacia hidrográfica (HUS de Snyder); b) aqueles baseados em um HU adimensional (HUS do SCS); e c) aqueles baseados nos modelos de armazenamento das bacias hidrográficas (HUS de Clark).

Com uma perspectiva mais atualizada, Singh et al. (2014) classificaram os métodos em quatro grupos: a) tradicional; b) conceitual; c) probabilístico e d) geomorfológico. Os modelos de HUS tradicionais (a) baseiam-se em equações empíricas, cujos coeficientes variam em ampla faixa de valores. Os modelos conceituais (b) são baseados na equação da continuidade e no armazenamento linear. Já os modelos probabilísticos (c) utilizam uma abordagem paramétrica e aplicam funções densidade de probabilidade para derivação dos HUS. Por fim, os modelos geomorfológicos (d) utilizam as características geomorfológicas das bacias hidrográficas para desenvolver hidrogramas unitários instantâneos (HUI). A TABELA 1 reproduz de Singh et al. (2014) uma síntese do levantamento dos métodos de HUS e respectivos autores.

TABELA 1 – Classificação dos métodos de HUS segundo Singh et al. (2014)

Método	Autor ¹
<i>Tradicionais</i>	
HUS de Snyder	Snyder (1938)
Modelo de Taylor e Schwarz	Taylor e Schwarz (1952)
Modelo adimensional Soil Conservation Service	SCS (1957)
<i>Conceituais</i>	
HUI de Clark	Clark (1945)
HUI de Nash	Nash (1957)
HUI de Dooge	Dooge (1959)
HUI Não-Linear	Singh (1964)
Cascata Paralela Urbana	Diskin et al. (1978)
Modelo Híbrido	Bhunya et al. (2005)
Modelo Híbrido Extendido	Singh et al. (2007)
<i>Probabilísticos</i>	
Gamma Dois Parâmetros (2PGD)	Nash (1959), Aron e White (1982)
2PGD Gray	Gray (1961)

Continua na próxima página

TABELA 1 – Classificação dos métodos de HUS segundo Singh et al. (2014)

Método	Autor ¹
2PGD Croley	Croley (1980)
Transmutação	Singh (2000)
Gamma Simplificado	Bhunya et al. (2003)
Gamma Dois Parâmetros (2PGD) e Beta Três Parâmetros (3PBD)	Haktanir e Sezen (1990)
Gamma Dois Parâmetros (2PGD), Beta Três Parâmetros (3PBD), Weibull 2 Parâmetros (2PWD), Distribuição Qui-Quadrado Um Parâmetro (1CSD) e Distribuição Fréchet Dois Parâmetros (2PFD)	Koutsoyiannis e Xanthopoulos (1989), Bhunya et al. (2007, 2008, 2009)
Log Normal Dois Parâmetros, Gamma Dois Parâmetros, Gamma Inversa Dois Parâmetros, Beta Três Parâmetros, Kumaraswamy Três Parâmetros, Two-sided power Três Parâmetros, Pareto Dois Parâmetros, Gaussian Inversa Dois Parâmetros, F Dois Parâmetros, Weibull Dois Parâmetros e Distribuição de Fréchet Dois Parâmetros	Nadarajah (2007)
Nakagami-m	Sarkar et al. (2010), Sarkar e Rai (2011)
<i>Geomorfológicos</i>	
HUI Geomorfológico (HUIG)	Rodríguez-Iturbe e Valdés (1979)
HUI Geomorfo-climático	Rodríguez-Iturbe et al. (1982)
Gamma	Duchesne et al. (1997)
HUIG Hidráulico	Kirshen e Bras (1983)
Geomorfológico Cascata Não-Linear	Bérod et al. (1995)
Redes Neurais Artificiais Geomorfológico	Zhang e Govindaraju (2003)
HU Geomorfológico de Nash	Nourani et al. (2009)
HUI da Função Largura	Kirkby (1976),
HUI Parcimonioso	Grimaldi et al. (2012)
HUI da Função Largura Re-Escalada	Rinaldo et al. (1995)
Algoritmos de Caracterização Automatizada da Rede de Fluxo	O'Callaghan e Mark (1984)
Estudos de HUIG baseados em Modelo Digital do Terreno	Snell e Sivapalan (1994)

¹ As referências estão em Singh et al. (2014)

O HUS de Snyder utiliza equações empíricas, obtidas do estudo de bacias hidrográficas com áreas de drenagem entre 26 e 26.000 km² nos Estados Unidos, para estimar os parâmetros e as larguras do hidrograma a 50% e 75% do pico. O modelo de Taylor e Schwarz foi derivado para áreas de 50 e 4.000 km², considerando juntamente características das bacias hidrográficas. O HUS do SCS, representado por um HU adimensional de formato triangular, teve sua origem a partir de experimentos de campo em um grande número de pequenas bacias hidrográficas rurais na região centro-oeste dos Estados Unidos. Sua adimensionalidade é assumida em termos de forma, tamanho e localização das bacias hidrográficas, o que pode não ser justificado dada a sua essência empírica. O método de Clark envolve a aplicação de uma chuva unitária instantânea e a rotina de cálculo proveniente do conceito de reservatório linear. O HUS 2PGD foi desenvolvido a partir do estudo da interrelação de características geomorfológicas das bacias hidrográficas no formato do hidrograma, utilizando funções densidade de probabilidade para gerar gráficos com área unitária (SINGH et al., 2014; CUNHA et al., 2015; THORVAT; PATEL, 2016).

Segundo Singh et al. (2014), os métodos tradicionais de HUS de Snyder e do SCS e os modelos conceituais de HUS de Nash e Clark são os mais utilizados em estudos hidrológicos, nas mais diversas regiões, enquanto os outros modelos necessitam ser melhor explorados para que seja possível uma análise acerca da sua precisão e aplicabilidade. Já os modelos probabilísticos são considerados importantes na medida em que a abordagem probabilística evita a subjetividade do formato do HU para satisfazer a restrição do volume unitário. O desenvolvimento dos modelos de HUS geomorfológicos possibilitou a determinação mais precisa dos parâmetros e forma dos hidrogramas, uma vez que os avanços na precisão dos modelos digitais de elevação aplicados simultaneamente a *softwares* de extração das informações geomorfológicas das bacias hidrográficas melhoraram consideravelmente a aplicabilidade desses modelos.

2.4 ESTUDOS APLICADOS COM HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS

Hoffmeister e Weisman (1977) analisaram comparativamente a acurácia dos métodos de HUS do SCS, de Snyder e de Commons em duas regiões hidrológicas da Nova Zelândia, para bacias hidrográficas com áreas de drenagem variando de 5 a 520 km². Com base nos resultados obtidos, constataram que no método do SCS as vazões de pico do hidrograma variaram de 15% abaixo a 34% acima dos valores observados. Além disso, o formato do hidrograma não se aproximou daquele obtido para os HU determinados. Quanto ao HUS de Snyder, os coeficientes das equações apresentaram variações pequenas para bacias hidrográficas de uma mesma região, indicando se tratarem de uma propriedade regional. Ademais, o método superestimou

em até 25% a vazão de pico em todos os casos, sendo considerado, no entanto, conservador e aceitável dentro da faixa de erro esperada para HU empíricos. Ainda, foi constatado que a utilização de informações de uma segunda bacia para calibrar os coeficientes do modelo melhorou os resultados em todos os casos. Com relação ao método de Commons, a vazão de pico estimada variou de 21% abaixo a 26% acima dos valores observados, além da discrepância de formatos entre os hidrogramas estimado e observado, principalmente no trecho de recessão. Dessa maneira o método de Snyder apresentou os melhores resultados no que tange ao desenvolvimento de HUS nas regiões analisadas. Outrossim, ressaltou-se que os erros no estudo realizado podem ser oriundos de diversas fontes e etapas, tais como imprecisões nas leituras de cotas, curvas de descarga e registros de chuvas, aplicação da teoria do HU a eventos reais e variações hidrológicas locais.

Com o objetivo de qualificar o uso de HUS em pequenas bacias hidrográficas sem dados de monitoramento, Thorvat e Patel (2016) avaliaram os métodos ditos tradicionais para uma bacia de 156 km² na Índia e obtiveram erros relativos de cerca de 15% abaixo a 100% acima nas vazões de pico, bem como erros relativos da ordem de 50% em parâmetros de forma dos hidrogramas, em relação aos hidrogramas observados.

No estudo conduzido por Zakizadeh e Malekinezhad (2015), foram comparados os resultados de diversos parâmetros dos HUS de Nash, Rosso, SCS, geomorfológico e geomorfo-climático entre si e com os hidrogramas observados para eventos de cheia em uma bacia hidrográfica de 60 km² no Irã. Em geral, os métodos foram eficientes apenas na estimativa do volume direto escoado, sendo, portanto, considerados insatisfatórios para caracterização dos hidrogramas de escoamento direto. De modo a contornar essas discrepâncias, foi recomendada a calibração das relações matemáticas conforme condições morfológicas regionais.

Com relação ao estudo dos HUS no Brasil, Tucci (2003) avaliou que as limitações do método originam diferentes hidrogramas, de acordo com cada evento, de modo que a estimativa de um HU médio e de HUS é subjetiva. A partir de dados de bacias hidrográficas com áreas de drenagem inferiores a 50 km² e predominantemente urbanas, foram determinadas novas equações para a vazão de pico, tempo de pico e tempo de concentração para alguns eventos representativos de inundações pequenas e médias, aproximadamente até 10 anos de tempo de recorrência. Os resultados foram comparados com o HUS do SCS, com o tempo de concentração calculado por dois métodos: com base na declividade e comprimento do rio corrigidos em função dos fatores de canalização e urbanização e pelo método cinemático. Observou-se que o HUS do SCS para o tempo de concentração calculado em função da declividade e comprimento do rio subestimou o pico e superestimou o tempo de concentração em

relação aos HU representativos, enquanto os resultados para o tempo de concentração do método cinemático se aproximaram dos HU representativos.

De acordo com Cunha et al. (2015), vem sendo observado que a aplicação desses modelos tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico, principalmente quando as magnitudes dos eventos são maiores, o que tem resultado no superdimensionamento de estruturas hidráulicas, não condizentes com a escala das bacias hidrográficas e com as observações de enchentes locais.

Adicionalmente, estudos realizados para avaliar os parâmetros definidos nos procedimentos existentes de obtenção de HUS, a fim de verificar a validade dos mesmos para bacias hidrográficas com características diferentes daquelas onde foram executados os estudos que deram origem aos modelos, reafirmam a necessidade de maior prudência ao se aplicar os modelos de obtenção de HUS definidos com dados empíricos regionais (SILVEIRA, 2016).

2.5 SÍNTESE E PANORAMA DOS MÉTODOS DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS

Uma vez levantados os principais métodos de HUS existentes e analisados alguns resultados obtidos a partir de sua aplicação em diversas condições e localidades, buscou-se realizar um panorama das informações consideradas mais relevantes para este estudo. Nesse sentido, a FIGURA 3 sintetiza as principais vantagens e limitações de tais métodos.

Desde a sua criação, em 1938, até o presente momento, o método do HUS foi submetido a diversas modificações e aprimoramentos, resultando na disponibilidade de uma vasta gama de modelos. Entretanto, apesar das críticas e do desenvolvimento em profusão de novos métodos, a robustez e praticidade de aplicação de HUS ditos tradicionais e conceituais, como os de Snyder, SCS e Clark, tornam os mesmos ainda largamente utilizados. Nessa perspectiva, diversos órgãos brasileiros (e.g. DNIT, DER, ELETROBRÁS, Sanepar, Prefeituras Municipais) preconizam em seus manuais a utilização desses métodos, juntamente com o método CN da chuva efetiva (SCHECHI et al., 2013), para a estimativa de vazões máximas de projeto.

Considerando as conjecturas e simplificações adotadas nesses métodos, assim como os erros nos resultados obtidos e a tendência de superestimação das vazões de pico calculadas, ressalta-se a importância da análise comparativa na definição do mais adequado para a modelagem hidrológica da região de interesse.

FIGURA 3 – Vantagens e limitações dos principais métodos de HUS

Métodos	Vantagens	Limitações
Tradicional		
HUS de Snyder HUS de Taylor e Schwarz HUS adimensional SCS	-Fácil aplicação -Simplicidade -Número limitado de parâmetros	-Ajuste manual dos pontos característicos, conferindo grande subjetividade -Ajuste manual para obtenção da área unitária -Parâmetros empíricos que variam amplamente e podem não ser aplicáveis a todas as situações -Relações empíricas limitam a regiões climáticas e geográficas semelhantes
Conceitual		
HUI de Clark HUI de Nash HUI de Dooge	-Consideram fenômenos físicos -Número limitado de parâmetros	-Coeficiente de armazenamento K de difícil estimação -Discrepâncias matemáticas nas equações
Probabilístico		
Gama Dois Parâmetros Beta Três Parâmetros Log Normal Dois Parâmetros	-Condição de volume unitário satisfeita -Formato representado por funções de densidade de probabilidade -Simplicidade	-Relações empíricas limitam a aplicação dentro da faixa para qual foram desenvolvidas
Geomorfológico		
HUI Geomorfológico HUI Geomorfo-climático HUI Parcimonioso	-Condição de volume unitário satisfeita -Formato representado por funções de densidade de probabilidade -Fornece base física ao ajuste do hidrograma -Número limitado de parâmetros -Determinação de características geomorfológicas facilitadas por ferramentas SIG	-Suposição de uma distribuição exponencial para o tempo de deslocamento da água, sem justificativa física -Seleção de um valor apropriado para o parâmetro velocidade média da cheia

FONTE: Adaptado de Hoffmeister e Weisman (1977), Singh et al. (2014), Zakizadeh e Malekinezhad (2015), Thorvat e Patel (2016) e Silveira (2016)

2.6 INCERTEZA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA CHUVA-VAZÃO

Um modelo hidrológico, mesmo que forneça valores razoáveis para a finalidade a qual se destina, será sempre uma aproximação da realidade. Nesse contexto, a incerteza destaca-se por fornecer uma estimativa do intervalo de valores dentro do qual o “valor verdadeiro” se encontra, ou seja, a dispersão dos valores que poderiam ser atribuídos ao “valor verdadeiro” (JCGM, 2008).

A incerteza é, portanto, inerente a esse processo e o conhecimento do seu efeito sobre os resultados faz-se necessário. Apesar da sua importância, Lima et al. (2007) afirmam que esse tipo de análise não é praticada regularmente no processo de modelagem hidrológica.

Na modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas há três componentes principais de incerteza. Inicialmente, há a incerteza nos dados, referente aos erros introduzidos a partir dos dados de entrada, oriundos de observações, medições, processamentos ou escalas temporais e discretizações adotadas no procedimento de medição.

Com relação aos modelos propriamente ditos, a incerteza estrutural na descrição dos processos decorre de simplificações e inadequações na representação dos processos físicos. Já as incertezas nos parâmetros do modelo devem-se ao desconhecimento, em geral, das condições de contorno (HRACHOWITZ et al., 2013; WAGENER et al., 2004).

Via de regra, nas simulações hidrológicas assume-se que não existem, ou são insignificantes, os erros nos dados de entrada (medições e observações de campo). Em contrapartida, Lima et al. (2007) mostraram que tais erros trazem consequências importantes para o processo de calibração das simulações e validação dos resultados obtidos, quando estes são comparados aos dados observados. Entretanto, o fator limitante do desempenho dos modelos hidrológicos é considerado, por Wagener et al. (2004), como sendo a incerteza estrutural.

Desse modo, é conveniente abordar as incertezas e os erros oriundos dos dados de entrada e das inadequações do modelo. As incertezas nos dados de entrada podem ser reduzidas, mediante uma análise de consistência criteriosa dos mesmos. Já as incertezas das inadequações do modelo devem ser conhecidas.

Diferentes abordagens foram propostas para se estimar a incerteza nas previsões hidrológicas. Aquelas ditas convencionais estimam a média e a variância dos resultados das variáveis modeladas. Dentre outros métodos, pode-se citar a Estimativa de Incerteza de Verossimilhança Generalizada (*Generalised Likelihood Uncertainty Estimation* - GLUE) e simulações baseadas no método de Monte Carlo, tal como *Monte Carlo Set Membership* (MCSM). De acordo com EMAM et al. (2018), devido à grande quantidade de combinações possíveis entre os diversos modelos hidrológicos e de análise de incertezas, para a definição do melhor método de análise de incerteza é importante que seja avaliado o desempenho de diferentes métodos frente ao modelo hidrológico selecionado e área de estudo, o que nem sempre é viável de se realizar.

Por outro lado, como as incertezas oriundas de inadequações e erros estruturais dos modelos não permite a estimativa de uma estrutura probabilística para descrevê-lo, uma vez que os erros não são aleatórios no sentido probabilístico (WAGENER et al., 2004), a utilização de parâmetros que caracterizam a dispersão dos valores em relação ao “valor verdadeiro” é uma abordagem operacional que exprime de modo razoável a incerteza dos resultados (JCGM, 2008).

No que concerne à incerteza em HUS, Brunner et al. (2018) quantificaram separadamente as diversas fontes de incerteza em hidrogramas sintéticos, desde a seleção dos dados amostrais até a incerteza total final, passando pelas etapas de construção do hidrograma sintético e regionalização para outros locais. As incertezas na vazão de pico foram de 25%, 40% e 50% respectivamente para a construção dos hidrogramas, regionalização e total.

Em outra abordagem, Steinmetz et al. (2019) avaliaram a influência da modelagem concentrada e semi-distribuída na aplicabilidade do HUS do SCS e de Clark em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil, com área de drenagem de 120 km². Na modelagem concentrada, os erros relativos médios entre a vazão de pico simulada e observada para os eventos de cheia variaram de 34% a 137%, no caso do HUS do SCS, e de 26% a 85% no caso do HUS de Clark. Na modelagem semi-distribuída, os resultados reforçaram o baixo desempenho dos HUS, cujos erros médios na vazão de pico variaram de 76% a 594% e de 21% a 103%, respectivamente para os métodos do SCS e Clark. Dessa maneira, a discretização espacial piorou as incertezas na estimativa das vazões de pico quando da aplicação dos HUS.

Adicionalmente, Steinmetz et al. (2019) constataram que os picos dos hidrogramas simulados foram antecipados, indicando que a estimativa dos parâmetros dos modelos também se constituíam fontes de incertezas na obtenção dos resultados finais.

Pode-se constatar, assim, que a aplicação dos HUS acrescida do conhecimento da faixa de valores que caracteriza a incerteza desses modelos é oportuna, especialmente do ponto de vista da aplicação prática desses modelos, muitas vezes associada a análises de segurança e de custo-benefício (BRUNNER et al., 2018).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

“A vazão de um rio é resultado da interação entre a precipitação e as características da bacia.”

Collischonn e Dornelles (2013)

Este capítulo apresenta os critérios para seleção da área de estudo e as etapas de cálculo a partir dos dados de entrada até a construção dos HUS. A obtenção dos dados de entrada envolve a separação do escoamento de base, a determinação da chuva efetiva e a caracterização morfométrica das bacias hidrográficas.

3.1 SELEÇÃO DE DADOS E ÁREA DE ESTUDO

Estudos hidrológicos possuem como subsídio primordial dados das estações de monitoramento integrantes de uma rede hidrometeorológica. No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) é a entidade responsável pelo monitoramento e disponibilização dos dados oriundos das estações fluviométricas, que registram níveis e vazões, e pluviométricas, que registram chuvas.

As estações de monitoramento podem ser do tipo convencional, com coletas diárias dos dados por observação de campo, ou telemétricas, cujas medições são realizadas automaticamente em um intervalo de tempo inferior ao diário. Nas estações fluviométricas convencionais, as leituras do nível do rio são realizadas às 7 e 17 horas, adotando-se o valor médio. Já nas estações pluviométricas convencionais, a chuva diária acumulada é coletada às 7 horas e atribuída ao dia anterior (ANA, 2016).

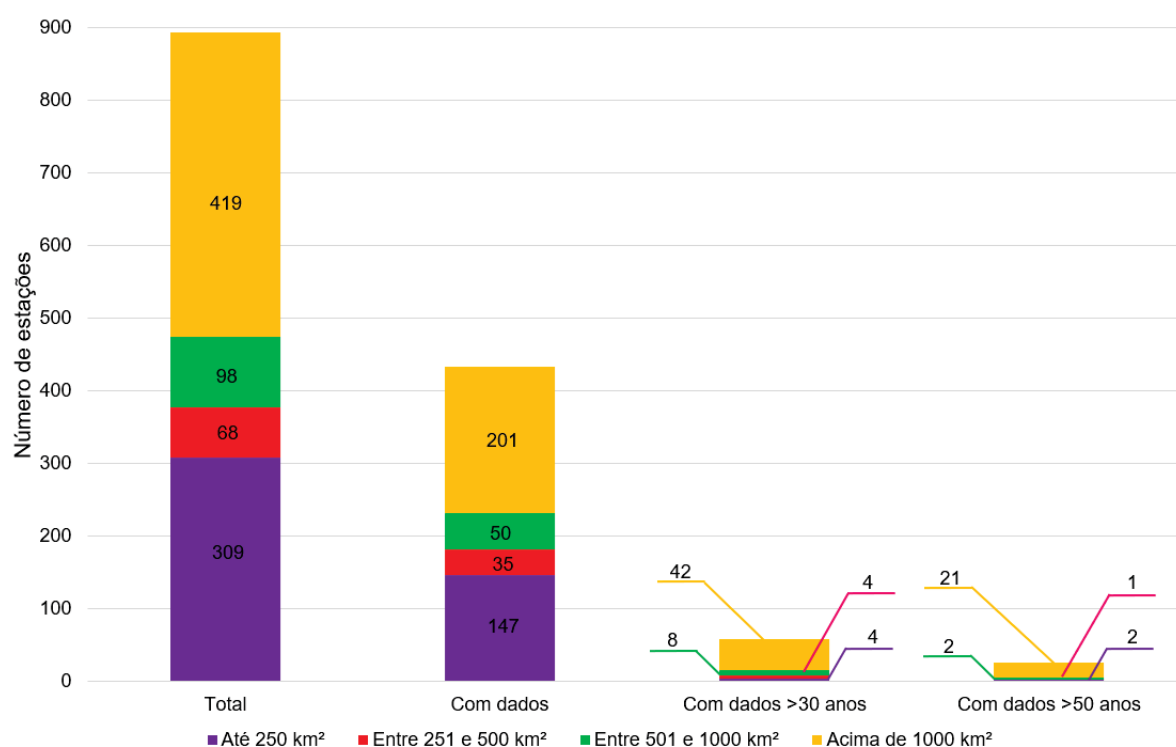
A rede de estações fluviométricas e pluviométricas do estado do Paraná, onde se buscou as áreas de estudo, bem como os dados hidrológicos utilizados neste estudo foram obtidos junto à ANA.

A partir da totalidade da rede de estações fluviométricas, na qual identificou-se a existência de 894 estações, foram selecionadas as estações de interesse para este estudo, levando-se em consideração dois critérios: área de drenagem e disponibilidade de dados. Como o escopo deste estudo compreende a comparação de respostas hidrológicas, simuladas e observadas, em pequenas bacias hidrográficas, optou-se pela utilização de dados de vazão oriundos de estações fluviométricas com áreas de drenagem de até 250 km², conforme preceito adotado por Raudkivi (1979). Além disso, a fim de analisar eventos de cheia de maior magnitude, foram buscadas aquelas que possuíam mais de 50 anos de dados. Segundo Tucci et al. (1995), a seleção do tempo de recorrência de um evento hidrológico define os riscos a serem assumidos

no dimensionamento das instalações. Para estruturas projetadas em pequenas bacias hidrográficas, os tempos de recorrência usualmente adotados são da ordem de 2 a 100 anos, sendo os valores mais elevados relacionados a estruturas de maior porte e importância (DENVER, 2001 apud CANHOLI, 2005).

Com relação ao primeiro critério, as estações foram separadas em quatro subgrupos de áreas de drenagem, a saber: até 250 km², de 251 a 500 km², de 501 a 1000 km² e acima de 1000 km². Quanto à disponibilidade de dados, analisou-se a extensão das séries de dados de vazões médias diárias das estações, com base no número de anos com registros de vazão. A partir do diagrama de disponibilidade de dados, para cada estação foi contabilizado o número de anos com dados disponíveis. A FIGURA 4 sintetiza a quantidade de estações fluviométricas por subgrupo de área de drenagem e em relação à disponibilidade de dados.

FIGURA 4 – Quantidade de estações fluviométricas por subgrupo de área de drenagem (até 250 km², de 251 a 500 km², de 501 a 1000 km² e acima de 1000 km²) e disponibilidade de dados (com dados, com série de dados maior do que 30 anos e com série de dados maior do que 50 anos). Os gráficos destacam a carência de séries históricas em pequenas bacias hidrográficas, consequentemente dificultando a elaboração de estudos hidrológicos mais acurados para essas bacias.



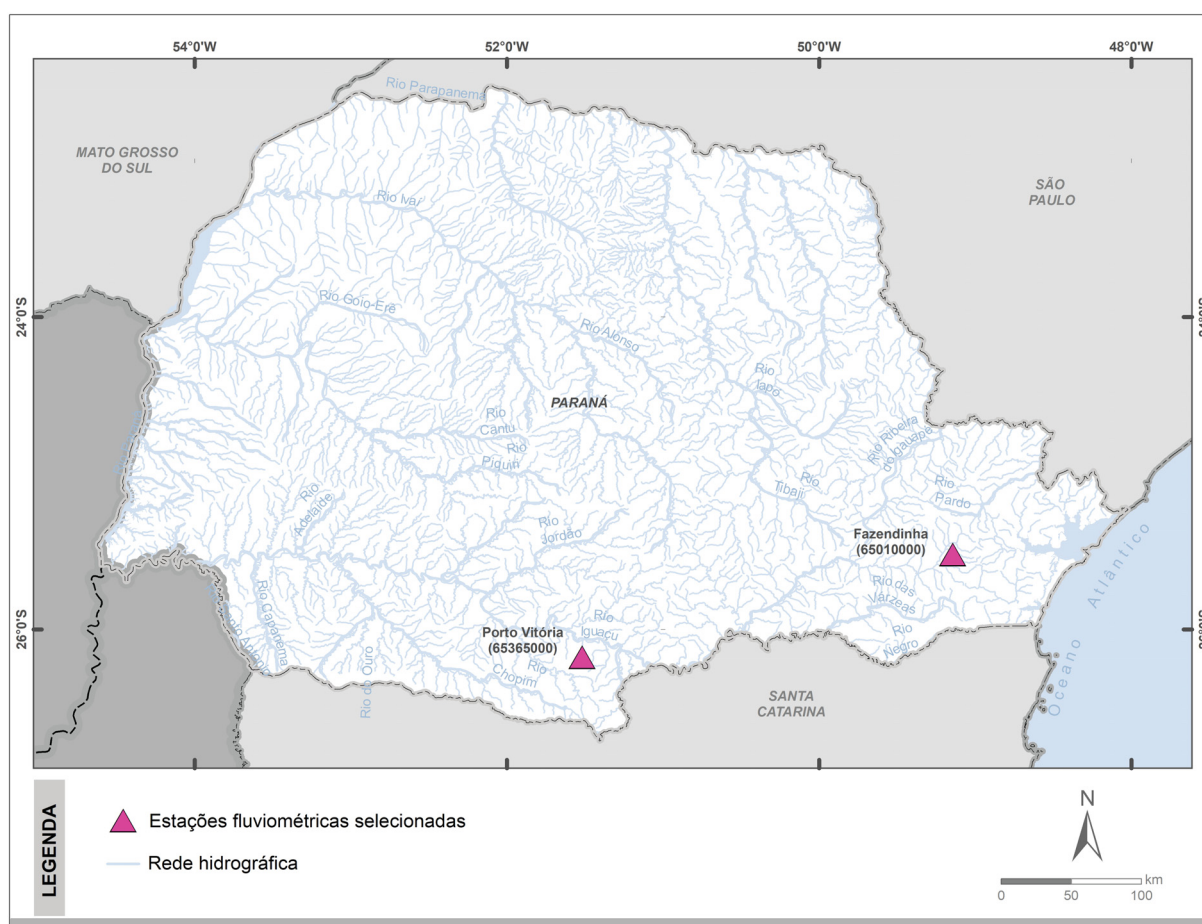
De acordo com os critérios estabelecidos, enquadraram-se as estações fluviométricas Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000), tendo sido selecionadas para este estudo. A TABELA 2 apresenta as principais informações dessas estações fluviométricas, segundo banco de dados da ANA, e a FIGURA 5 ilustra a localização

geográfica das mesmas.

TABELA 2 – Principais informações das estações fluviométricas selecionadas

Nome	Coordenadas geográficas	Rio	Município	Área (km ²)	Período de dados
Fazendinha (65010000)	25°31'09" S 49°08'48" O	Pequeno	S. José dos Pinhais	106	28/01/1955 31/12/2014
Porto Vitória (65365000)	26°10'38" S 51°31'11" O	Espingarda	Bituruna	65	19/11/1945 31/12/2014

FIGURA 5 – Localização das estações fluviométricas selecionadas



Uma vez determinadas as estações fluviométricas a serem utilizadas no estudo, procedeu-se com a seleção das estações pluviométricas. A partir da disponibilidade de dados diários de chuva, das 1179 estações existentes foram pré-selecionadas aquelas com período de dados compatíveis com as estações fluviométricas Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000).

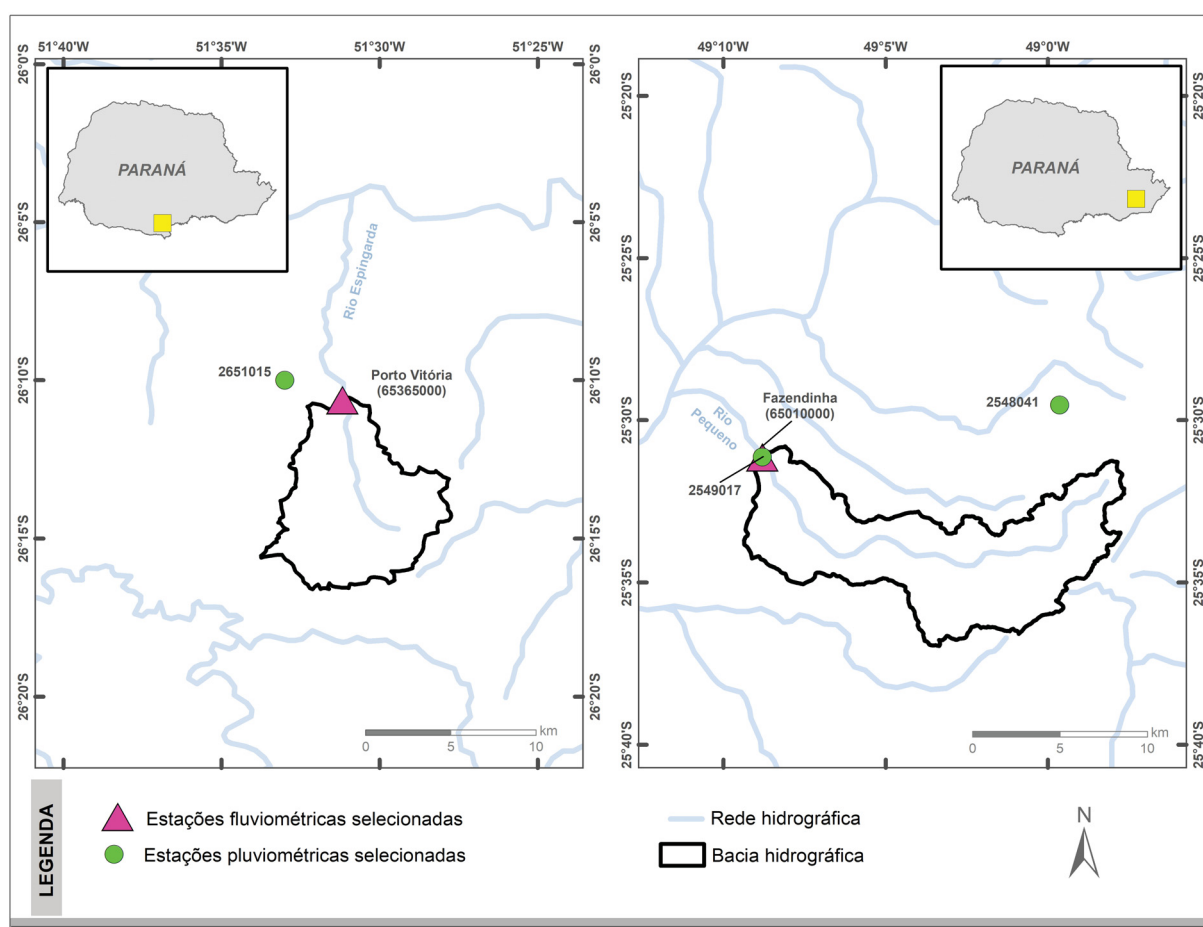
Com base na localização geográfica das 577 estações pluviométricas pré-selecionadas foram traçados os polígonos de Thiessen com o auxílio de ferramentas de

geoprocessamento, selecionando-se, assim, as estações que possuem influência nas bacias hidrográficas das estações Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000). O APÊNDICE A apresenta os polígonos de Thiessen traçados. A TABELA 3 lista as estações pluviométricas selecionadas e suas principais informações e a FIGURA 6 ilustra a localização geográfica das mesmas.

TABELA 3 – Principais informações das estações pluviométricas selecionadas

Est. fluviométrica associada	Estação pluviométrica			
	Nome	Coordenadas geográficas	Área de influência (km ²)	Período de dados
Fazendinha (65010000)	Fazendinha (2549017)	25°31'09" S 49°08'48" O	51	01/01/1982 31/12/2016
	Mananciais da Serra (2548041)	25°29'33" S 48°59'38" O	54	01/09/1916 31/12/2015
Porto Vitória (65365000)	Usina Bituruna (2651015)	26°10'00" S 51°33'00" O	65	01/03/1956 01/08/2007

FIGURA 6 – Localização das estações pluviométricas selecionadas



A região das bacias hidrográficas do rio Pequeno e do rio Espingarda, onde estão localizadas as seções de estudo das estações fluviométricas Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000), respectivamente, é caracterizada por clima temperado sem períodos úmido e seco definidos, de modo que o regime de chuvas é, via de regra, bem distribuído ao longo do ano (WREGE et al., 2012).

Com relação às características hidrológicas, Schechi et al. (2013) verificaram que a bacia do rio Pequeno, onde está localizada a estação Fazendinha (65010000), possui alto potencial de armazenamento devidos aos seus atributos de relevo e solo, sendo ressaltado, contudo, que a crescente impermeabilização do solo devido à ocupação antrópica tem causado alterações na capacidade de armazenamento e podendo afetar a resposta hidrológica da bacia. A bacia hidrográfica do rio Espingarda, na qual está instalada a estação Porto Vitória (65365000), é parte integrante da bacia hidrográfica do rio Iguaçu em seu trecho médio, caracterizado por declividades acentuadas e vales rochosos (MINE; TUCCI, 2002), conferindo a essa região comportamento hidrológico típico de bacias hidrográficas pequenas.

3.2 SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE

Para realizar a separação do escoamento em direto e de base foi utilizado o programa BFlow, descrito anteriormente no Capítulo 2, proporcionando resultados menos subjetivos em comparação com métodos manuais de separação do escoamento.

A partir das séries de vazões das estações fluviométricas, obteve-se o índice de escoamento de base (*BFI*), conforme apresentado na TABELA 4, e as séries referentes ao escoamento de base para cada passagem do filtro. O APÊNDICE B ilustra os fluviogramas de escoamento total, direto e de base para determinados períodos.

TABELA 4 – Índice de escoamento de base para as séries de vazões das estações selecionadas

Estação	Índice de escoamento de base (<i>BFI</i>)		
	1ª passagem	2ª passagem	3ª passagem
Fazendinha (65010000)	0,77	0,66	0,60
Porto Vitória (65365000)	0,72	0,59	0,52

Seguindo a recomendação de Arnold et al. (2005), os hidrogramas de escoamento direto foram obtidos descontando-se da vazão total o escoamento de base resultante da primeira passagem do filtro.

3.3 DETERMINAÇÃO DA CHUVA EFETIVA

Conforme mencionado anteriormente, as vazões de cheia em pequenas bacias hidrográficas são causadas principalmente pela chuva efetiva, parcela da chuva total que gera o escoamento direto. A estimativa da chuva efetiva pode ser realizada por meio de coeficientes que relacionam a chuva total ao volume escoado ou infiltrado ou de equações empíricas.

Quando da existência de dados de chuva e vazão no local de interesse ou em locais próximos, é possível utilizar os índices, que, em geral, conduzem a resultados mais acurados (BARBOSA; FILL, 2011). Entretanto, na situação mais comum, referente à ausência de dados históricos de vazão, faz-se necessário o uso das equações empíricas.

Para a simulação dos hidrogramas a partir das chuvas de projeto selecionadas (apresentados no Capítulo 4) adotou-se o método empírico do Número da Curva do SCS (USDA, 1986) para a estimativa da chuva efetiva, simulando a situação de ausência de dados. Esse método é amplamente utilizado na engenharia de recursos hídricos por sua simplicidade, número limitado de parâmetros e reputação da instituição de origem (CUNHA et al., 2015; VALLE JUNIOR et al., 2019).

No método do Número da Curva, a chuva efetiva (P_e , em mm) é calculada por

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3.1)$$

em que P é a chuva total (mm) e I_a são as abstrações iniciais (mm), que representam todas as perdas antes do início do escoamento direto, tais como interceptação, armazenamento em depressões, evaporação e infiltração. Segundo USDA (1986), o parâmetro I_a , apesar de altamente variável, apresenta certa correlação com o tipo e uso do solo. A partir de diversos estudos em pequenas bacias hidrográficas, a instituição chegou à representação de I_a pela equação empírica

$$I_a = 0,2S \quad (3.2)$$

na qual S representa a retenção máxima potencial do solo (mm) da bacia hidrográfica em estudo, estimada por

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.3)$$

em que CN é o parâmetro adimensional que representa as características de tipo e uso do solo e sua condição de umidade antecedente.

É importante destacar que com o intuito de avaliar a estimativa da chuva efetiva pelo método do CN, Valle Junior et al. (2019) compararam o coeficiente de abstração

inicial do método do CN, igual a 0,2, com coeficientes obtidos para uma área de estudo selecionada, no município de Campo Grande (MS). Os resultados demonstraram que para a grande maioria dos eventos analisados o coeficiente de abstração inicial foi inferior a 0,2, indicando a ocorrência de chuvas efetivas reais mais elevadas do que aquelas estimadas pelo método do CN. Ainda, resultados similares foram encontrados por outros autores em outros locais, evidenciando a incerteza desse método.

Os valores do parâmetro CN , variando em uma escala de 0 a 100, conforme as características de tipo e uso do solo, foram propostos originalmente por USDA (1986), porém são encontradas adaptações oriundas de estudos locais. Para a adoção do parâmetro CN para as bacias hidrográficas em estudo realizou-se o cruzamento dos mapas de tipo e uso do solo (ITCG, 2008; ITCG, 2001) para a determinação das suas áreas de ocorrência. Considerando o contexto dinâmico das intervenções antrópicas no uso do solo, as informações desse mapa foram validadas ou modificadas a partir de imagens de satélite atualizadas. A FIGURA 7 ilustra os resultados da análise espacial do uso do solo.

Os valores de CN variam também em função das condições de umidade antecedente do solo, baseada nas chuvas anteriores, e de condições mais específicas do uso do solo, tais como tipo de cultura ou condições da superfície. Para a seleção do CN , a condição média de umidade antecedente do solo foi adotada, tendo sido verificada predominante para os eventos de chuva selecionados. No entanto, a escala do mapa de uso do solo disponível para as áreas de estudo não possibilitou inferir sobre as condições específicas de uso do solo. Sendo assim, foram adotados os valores tabelados apresentados por Tucci (2010) utilizando-se, para comparação dos resultados produzidos, os valores máximos e mínimos possíveis para cada tipo de uso do solo para determinado grupo do solo. A TABELA 5 apresenta os CN máximo e mínimo adotados e a TABELA 6 a retenção máxima potencial do solo (S) e as abstrações iniciais (I_a) estimadas a partir dos CN .

FIGURA 7 – Mapa de uso do solo adaptado de ITCG (2001), utilizado para a definição do parâmetro CN . As bacias hidrográficas em estudo são predominantemente rurais, compostas por áreas de agricultura e vegetação florestal. Na bacia hidrográfica da estação Fazendinha (65010000) foram identificadas e delimitadas áreas edificadas, referentes a zonas residenciais urbanas, zonas industriais e instalações rurais. Já na bacia da estação Porto Vitória (65365000) foram identificadas e delimitadas as áreas de cobertura florestal.

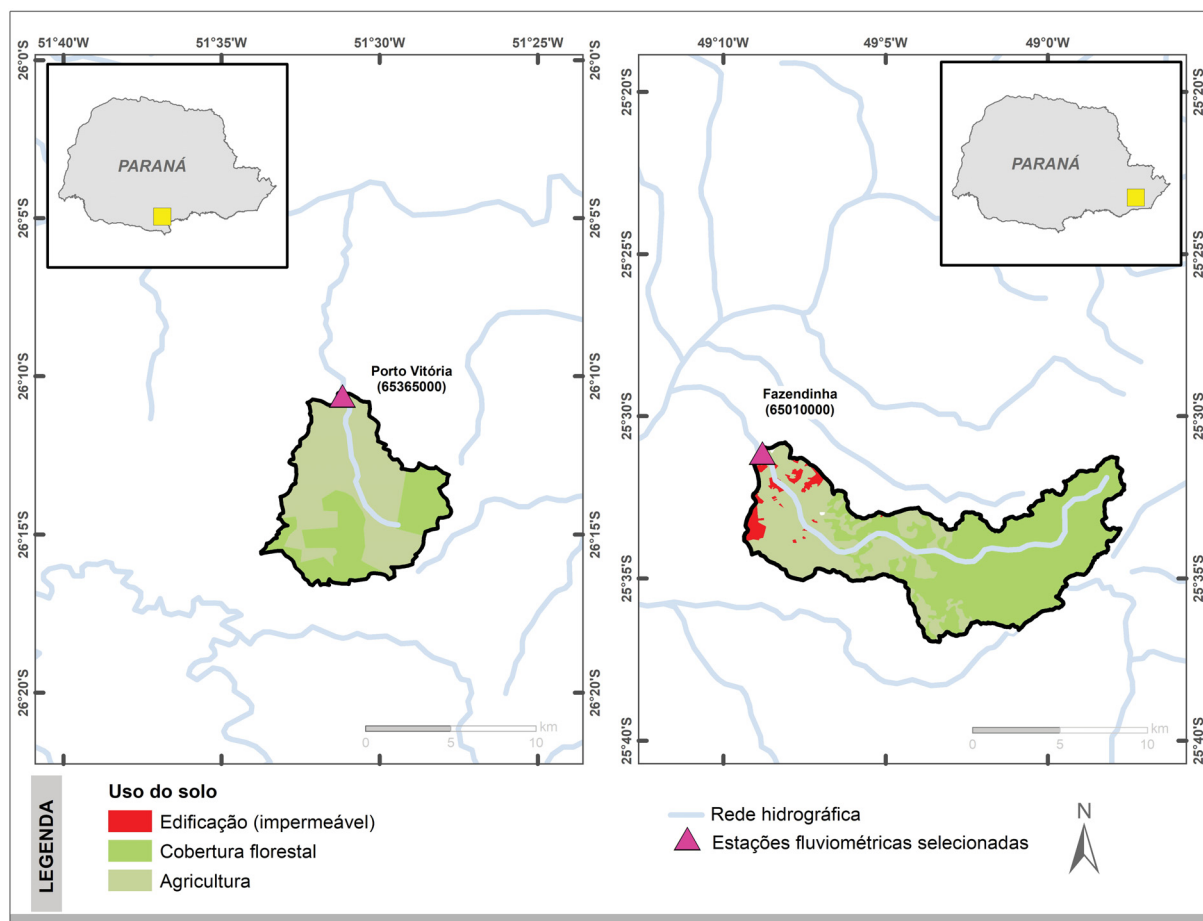


TABELA 5 – Definição do parâmetro CN

Local	CN mín	CN máx
Fazendinha (65010000)	54	78
Porto Vitória (65365000)	68	84

TABELA 6 – Retenção máxima potencial do solo (S) e abstrações iniciais (I_a) estimadas pelo método do CN

Local	Retenção máxima potencial S (mm)		Abstrações iniciais I_a (mm)	
	Máx	Mín	Máx	Mín
Fazendinha (65010000)	216	72	43	14
Porto Vitória (65365000)	120	48	24	10

Adicionalmente, estimou-se também a chuva efetiva para os eventos selecionados a partir do coeficiente de escoamento direto (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013), para fins de comparação com aquela obtida pelo método empírico do CN, uma vez que essa é a principal entrada dos modelos de HUS.

O coeficiente de escoamento direto (α) é calculado como a relação entre o volume escoado (V_e) e o volume total precipitado (V)

$$\alpha = \frac{V_e}{V} \quad (3.4)$$

o qual, aplicado à chuva total, fornece a chuva efetiva

$$P_e = \alpha P \quad (3.5)$$

Para a inserção das chuvas de projeto nos modelos de HUS foi realizada a desagregação e a discretização temporal da chuva de projeto diária.

A desagregação da chuva de projeto para durações menores que um dia foi realizada considerando-se o método das isozonas proposto por Torrico (1974), utilizado ainda hoje para a estimativa de chuvas intensas em diversos projetos de engenharia no Brasil (BASSO et al., 2016). Dessa maneira, a chuva diária acumulada foi convertida em chuvas de 24 horas, uma hora e 0,1 hora, utilizando-se os coeficientes empíricos do método para a isozona D, na qual estão inseridas as áreas de estudo.

Os valores das chuvas desagregadas (P) foram ajustados às curvas de altura-duração, segundo as equações

$$P = a_i \ln(t) + b \quad (3.6)$$

em que o tempo t é o tempo, em horas, e os coeficientes de ajustes a_i e b são iguais a

$$a_1 = \frac{P(0,1h) - P(1h)}{\ln(0,1h)}, \quad t < 1h \quad (3.7)$$

$$a_2 = \frac{P(0,1h) - P(1h)}{\ln(24h)}, \quad t \geq 1h \quad (3.8)$$

$$b = P(1h) \quad (3.9)$$

para permitir a discretização temporal da chuva diária em blocos.

O número de blocos de chuva foi determinado pelo quociente entre o tempo de concentração das bacias (t_c) e a duração da chuva unitária (D). Tais equações são apresentadas no seção 3.5, atreladas aos modelos de HUS.

As curvas altura-duração elaboradas a partir da Equação 3.6 para esse processo são apresentadas no APÊNDICE C. A TABELA 7 apresenta os blocos das chuvas discretizadas.

TABELA 7 – Discretização temporal das chuvas de projeto

Fazendinha (65010000)					Porto Vitória (65365000)				
Tempo (h)	Chuva incremental (mm)				Tempo (h)	Chuva incremental (mm)			
	TR 2	TR 5	TR 10	TR 50		TR 2	TR 5	TR 10	TR 50
0,8	36,29	44,22	49,66	69,70	0,3	23,77	31,59	36,29	45,75
1,5	11,09	13,51	15,18	22,09	0,6	8,24	10,95	12,58	15,67
2,3	6,54	7,97	8,95	13,04	0,9	4,82	6,41	7,36	9,18
3,0	4,64	5,66	6,35	9,25	1,2	4,70	6,25	7,18	9,35
3,8	3,60	4,39	4,93	7,18	1,5	3,64	4,84	5,55	7,24
4,6	2,94	3,58	4,03	5,86	1,7	2,97	3,95	4,53	5,91
5,3	2,49	3,03	3,40	4,96	2,0	2,51	3,33	3,83	4,99
6,1	2,15	2,63	2,95	4,29	2,3	2,17	2,89	3,32	4,32

3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

As características morfométricas das bacias hidrográficas nas seções de estudo, necessárias para a determinação dos HUS, foram estimadas a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e por meio de ferramentas de geoprocessamento.

Utilizou-se o MDE do Projeto Topodata, do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), gerado a partir dos dados *Shuttle Radar Topographic Mission* com resolução espacial de 90 m (SRTM-90), por sua vez disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), sendo então refinados com resolução espacial de 30 m. As principais características morfométricas estimadas para as bacias hidrográficas em estudo estão apresentadas na TABELA 8.

TABELA 8 – Características morfométricas das bacias hidrográficas das estações fluviométricas em estudo. A área de drenagem da bacia da estação Fazendinha (65010000) é cerca de 60% superior à área da bacia da estação Porto Vitória (65365000), contudo ambas são consideradas pequenas por esse atributo. A declividade da bacia da estação Fazendinha é baixa, divergindo que geralmente é esperado em bacias pequenas, porém mostra-se condizente com a característica de armazenamento dessa bacia.

Características morfométricas	Fazendinha (65010000)	Porto Vitória (65365000)
Área de drenagem (km ²)	105	65
Comprimento do rio principal (km)	27	12
Comp. do rio principal até o centroide da bacia (km)	13	5
Desnível ao longo do rio principal (m)	224	314
Declividade ao longo do rio principal (m/m)	0,008	0,026

3.5 DETERMINAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS

3.5.1 HUS de Snyder

O HUS de Snyder utiliza equações empíricas para estimar os pontos característicos do hidrograma, além das larguras, em horas, de 50% (W_{50}) e 75% (W_{75}) do pico, visando diminuir a subjetividade na determinação do formato do hidrograma. Tais parâmetros são calculados pelas seguintes equações

$$t_p = \frac{C_t}{1,33} (LL_c)^{0,3} \quad (3.10)$$

$$t_b = 3 + 3\left(\frac{t_p}{24}\right) \quad (3.11)$$

$$Q_p = 2,76\left(\frac{AC_p}{t_p}\right) \quad (3.12)$$

$$W_{75} = 1,25\left(\frac{Q_p}{A}\right)^{-1,12} \quad (3.13)$$

$$W_{50} = 2,20\left(\frac{Q_p}{A}\right)^{-1,12} \quad (3.14)$$

em que t_p e t_b são, respectivamente, o tempo de retardo (h) e o tempo de base (dia), L é o comprimento do curso d'água principal (km), L_c a distância da foz ou da seção considerada até o ponto mais próximo do centro de gravidade da bacia hidrográfica, ao longo do curso d'água principal (km), Q_p a vazão de pico ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$), A a área da bacia hidrográfica (km^2), e C_t e C_p são coeficientes regionais que variam de 1,8 a 2,2 e 0,56 a 0,69, respectivamente.

Verificou-se que foram realizados estudos para a estimativa dos coeficientes C_t e C_p em algumas regiões do Brasil, porém os resultados apresentaram grande variação entre si, não sendo constatado um valor ou faixa de valores que pudesse ser mais adequado para as áreas de estudo. Dessa maneira, os valores originais de C_t e C_p do método de Snyder foram adotados, realizando-se uma análise de sensibilidade com os valores mínimos e máximos de cada coeficiente.

3.5.2 HUS do SCS

O HUS do SCS fornece um hidrograma triangular a partir dos pontos característicos, dispensando o ajuste manual do formato do hidrograma. Para a determinação dos pontos característicos são utilizadas as equações

$$t_a = \frac{D}{2} + t_p \quad (3.15)$$

$$t_p = 0,6t_c \quad (3.16)$$

$$D = 0,133t_c \quad (3.17)$$

$$t_b = 2,67t_a \quad (3.18)$$

$$Q_p = 2,08\left(\frac{A}{t_a}\right) \quad (3.19)$$

nas quais t_a e t_c são respectivamente os tempos, em horas, de ascensão do hidrograma e de concentração da bacia hidrográfica e D é a duração da chuva unitária (h).

USDA (1986) afirma que o tempo de concentração (t_c), definido como o tempo de deslocamento do escoamento direto do ponto mais distante da bacia hidrográfica até a seção de interesse, é um parâmetro crítico para esse método. Segundo Mamédio et al. (2018), por se tratar de um parâmetro fundamental nas análises hidrológicas, foram desenvolvidos diversos estudos para o aprimoramento do conhecimento do t_c , resultando em uma vasta gama de equações empíricas. Dessa maneira, cada equação é, via de regra, válida para bacias hidrográficas com características morfométricas e de ocupação semelhantes àquelas que foram utilizadas em cada estudo.

Diante da importância do t_c para o HUS do SCS e da diversidade de equações disponíveis para a estimativa desse parâmetro, a seleção daquela a ser utilizada deve levar em consideração a compatibilidade entre as características basilares e as da bacia hidrográfica para a qual se tenciona aplicá-la. Ainda, é interessante realizar a análise de incerteza para esse parâmetro, através da comparação entre os resultados dos HUS utilizando t_c provenientes de mais de uma equação.

Uma das equações de t_c mais utilizadas e difundidas é a de Kirpich, dada por

$$t_c = 0,0663L^{0,77}S_0^{-0,385} \quad (3.20)$$

na qual S_0 é a declividade média do rio principal (m/m). Ademais, destacam-se as equações de Ven te Chow e do *US Army Corps of Engineers* (USACE), respectivamente iguais a

$$t_c = 0,160L^{0,64}S_0^{-0,32} \quad (3.21)$$

$$t_c = 0,191L^{0,76}S_0^{-0,19} \quad (3.22)$$

também desenvolvidas para pequenas bacias hidrográficas rurais e que apresentaram resultados satisfatórios (SILVEIRA, 2005).

A TABELA 9 apresenta os tempos de concentração para as bacias em estudo, estimados a partir da Equação 3.20, Equação 3.21 e Equação 3.22. Os valores variaram

aproximadamente de 5% a 15% no caso da estação Fazendinha (65010000) e de 0,2% a 38% no caso da estação Porto Vitória (65365000). Para a análise de sensibilidade foram considerados o valor máximo e mínimo dentre os três para cada bacia.

TABELA 9 – Tempos de concentração estimados

Local	Tempo de concentração (h)		
	Kirpich	Chow	USACE
Fazendinha (65010000)	5,3	6,11	5,81
Porto Vitória (65365000)	1,83	2,52	2,52

3.5.3 HUS de Clark

Originado do conceito de HUI, o HUS de Clark utiliza as seguintes equações

$$Q_i = C_1 A_i + C_2 Q_{i-1} \quad (3.23)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t}{(K + 0,5\Delta t)} \quad (3.24)$$

$$C_2 = 1 - C_1 \quad (3.25)$$

em que Q_i é a i -ésima ordenada do HUI ($\text{m}^3/\text{s cm}^{-1}$), A_i a i -ésima ordenada do diagrama tempo-área (h), C_1 , C_2 são coeficientes do modelo, Δt o intervalo de tempo (h) e K o coeficiente de armazenamento de um reservatório linear (h). Na ausência dessa informação, pode-se adotar 0,60 do t_c . O hidrograma final é obtido resolvendo-se a Equação 3.23 para cada intervalo de tempo, sucessivamente.

Como pode ser observado, o método de Clark é baseado na elaboração de um diagrama-tempo área. De acordo com Singh (2005), na maioria dos estudos que utilizam esse método os diagramas tempo-área são elaborados com base no tempo de concentração. Uma opção para a determinação dos parâmetros do HUS de Clark são *softwares* computacionais.

Dessa maneira, optou-se por utilizar, neste estudo, o HEC-HMS 4.2.1 do USACE para a simulação de todos os HUS.

3.6 CONFIGURAÇÕES DOS DADOS DE ENTRADA

Como parte da análise de incerteza dos modelos de HUS, foi analisada a influência dos parâmetros de entrada. Para tanto, foram definidas abordagens a partir de combinações entre os valores máximos e mínimos dos parâmetros de entrada calculados, tanto da chuva efetiva estimada pelo método do CN quanto de cada modelo de HUS. A TABELA 10 sintetiza as combinações consideradas. Cabe ressaltar que os termos máximo e mínimo referem-se aos valores numéricos adotados e não à maximização ou minimização dos resultados produzidos.

TABELA 10 – Parâmetros da análise de incerteza

Método	Parâmetro	Fazendinha (65010000)		Porto Vitória (65365000)	
		Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.
Número da curva	CN	54	68	78	84
HUS de Snyder	C_p	0,56	0,69	0,56	0,69
	t_p (h)	7,85	9,60	4,62	5,65
HUS do SCS	t_p (min)	191,07	220,02	65,76	90,81
HUS de Clark	K (h)	3,18	3,67	1,10	1,51

Com relação aos valores dos parâmetros acima, destaca-se os menores CN para a bacia hidrográfica da estação Fazendinha (65010000) que, apesar de possuir áreas edificadas e de agricultura, ainda apresenta grande extensão de área de cobertura florestal nas porções média e alta da bacia, reduzindo o valor desse parâmetro, ao passo que na bacia da estação Porto Vitória (65365000) predominam as áreas de agricultura, com valor mais elevado de CN . Entretanto, observa-se maior amplitude entre os valores mínimo e máximo para a estação Fazendinha (65010000) em comparação com a estação Porto Vitória (65365000), indicando haver maior incerteza no caso da primeira. Quanto aos tempos de pico dos hidrogramas, compativelmente com o porte das bacias hidrográficas os valores são da ordem de grandeza de poucas horas. É importante destacar, no entanto, que o tempo de pico calculado pelo método de Snyder resulta cerca de duas vezes superior ao tempo de pico calculado pelo método do SCS e também superior ao tempo de concentração. Isso já expõe a diferença existente entre os métodos, que conseqüentemente produzirão diferenças em seus resultados.

Para cada HUS, a conjuntura dos parâmetros de entrada que produziu as maiores vazões de pico foi considerada conservadora sob o enfoque da estimativa dos parâmetros. Similarmente, a combinação responsável pela menor vazão de pico foi considerada arrojada na estimativa dos parâmetros. Portanto, os termos “conservador” e “arrojado” foram adotados para referenciar as abordagens com as maiores e menores vazões de pico produzidas, respectivamente.

A TABELA 11 apresenta as combinações que resultaram nas abordagens conservadora e arrojada para cada método de HUS. O CN do método da chuva efetiva foi o parâmetro mais sensível. Variações nos demais parâmetros produziram diferenças na vazão de pico de até cerca de 45% no método de Snyder e até aproximadamente 3% para o HUS do SCS e Clark.

TABELA 11 – Discretização temporal das chuvas de projeto

Abordagem	SCS		Snyder			Clark	
	CN	T_p	CN	C_t	C_p	CN	K
Conservador	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Mín.
Arrojado	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Mín.	Máx.

4 CONSISTÊNCIA DOS DADOS HIDROLÓGICOS

“Dados e informações devem apoiar processos de tomada de decisão, inerentes à gestão integrada dos recursos hídricos”

ANA (2016)

Este capítulo apresenta, de forma conjunta, os procedimentos de consistência dos dados hidrológicos e os resultados desse processo clássico e fundamental da hidrologia, preliminar a qualquer análise. Intencionalmente, métodos e resultados foram agregados neste capítulo para garantir uma continuidade do entendimento. Adicionalmente, ao final são apresentados os eventos chuva-vazão selecionados para análise.

4.1 DADOS FLUVIOMÉTRICOS

A confiabilidade dos resultados das análises hidrológicas depende, inicialmente, da qualidade dos registros das variáveis hidrometeorológicas utilizadas. Conforme Santos et al. (2001), os registros procedem de observações e medidas realizadas, sendo, portanto, suscetíveis a erros. Isto posto, faz-se necessária a análise de consistência para identificação, correção ou exclusão dos dados espúrios. A consistência dos dados fluviométricos envolve análises comparativas com dados de outras estações na mesma bacia hidrográfica ou em bacias circunjacentes, bem como análises individuais das próprias observações. Dentre as análises individuais, destaca-se a consistência das medições de descarga, da curva de descarga e das cotas da estação (ANA, 2011).

4.1.1 Medições de Descarga

As medições de descarga relacionam a cota e a vazão do rio. Dessa maneira, a consistência das medições foi realizada por inspeção gráfica da relação entre cota e vazão, bem como os valores de cotas das medições nos cotagramas das estações, buscando a identificação visual de *outliers*.

A partir dessa abordagem, não foram observadas medições de descarga consideradas espúrias, que necessitassem ser corrigidas ou excluídas. As dispersões nos gráficos cota vs. vazão foram analisadas em detalhe na etapa de consistência da curva de descarga. Já as eventuais discrepâncias das cotas das medições em relação ao cotograma médio diário foram consideradas aceitáveis, tendo em vista a diferença de métodos e horários na tomada dos registros.

4.1.2 Curva de Descarga

A curva de descarga, ou curva-chave, de uma estação relaciona as leituras de cotas em uma seção do rio com as vazões naquele local. A representação da curva de descarga pode ser realizada por meio de gráficos, tabelas ou equações exponenciais ou polinomiais.

Segundo Jaccon e Cudo (1989), o traçado gráfico de curvas de descarga é manual e envolve alto grau de subjetividade. Já a representação por tabela relaciona diretamente as cotas e vazões correspondentes para intervalos definidos de acordo com a precisão desejada. Por outro lado, as equações matemáticas permitem o ajuste automático dos parâmetros, introduzindo métodos analíticos e celeridade ao processo. Ainda, a equação do tipo exponencial, apresentada na forma

$$Q = a(h - h_0)^n, \quad (4.1)$$

na qual Q é a vazão, h é a cota, e a, h_0, n são parâmetros constantes, possui significado físico, embasado na hidráulica de canais (SANTOS et al., 2001).

Com relação à consistência da curva de descarga, Lopes et al. (2013) recomendam a análise dos seguintes critérios: i) distribuição uniforme dos desvios, ou erros, entre as medições de descarga e as vazões calculadas em relação às cotas; ii) distribuição uniforme dos desvios entre as medições e as vazões calculadas em relação ao tempo; e iii) análise visual da compatibilidade entre si das curvas traçadas.

Sendo assim, a curva de descarga das estações fluviométricas foi avaliada a partir das diretrizes acima expostas e com o uso do *software* Sistema para Análise de Dados Hidrológicos (SiADH), desenvolvido pela ANA para auxiliar as análises de dados fluviométricos.

A estação Fazendinha (65010000) possui nove curvas de descarga, que compreendem toda a série ou são divididas em períodos temporais de validade. Entretanto, da análise conjunta das curvas, baseada na inspeção visual da compatibilidade entre si e da aderência em relação às medições de descarga, bem como nas estatísticas de distribuição dos desvios, pode-se perceber que as curvas-chave divididas em períodos de validade não se tratam de curvas aptas a serem utilizadas para a determinação de vazões. Portanto, como curva de descarga original, considerou-se a curva-chave única, do tipo tabela, válida para o período de 28/01/1955 a 31/12/2017. A estação Porto Vitória (65365000) possui, entre 19/11/1945 a 31/12/2010, seis curvas de descarga, das quais duas foram consideradas inaptas, pelos mesmos motivos expostos anteriormente.

A TABELA 12 apresenta os erros médios relativos entre as medições de descarga e as vazões calculadas pelas curvas-chave originais obtidas da ANA para as estações Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000).

TABELA 12 – Características da curva de descarga original das estações fluviométricas selecionadas

Estação	Período de validade	Desvio médio absoluto (%)	Desvio (%)	
			Positivo	Negativo
Fazendinha (65010000)	28/01/1955 a 31/12/2017	17	51	49
Porto Vitória (65365000)	19/11/1945 a 10/04/1959	9	35	65
	11/04/1959 a 31/12/1975	16	49	51
	01/01/1976 a 19/06/1984	18	77	23
	20/06/1984 a 31/12/2005	13	55	45

ANA (2011) considera que desvios, entre as vazões medidas e calculadas, de até 5% são bons, até 10% são considerados satisfatórios e até 20% são aceitáveis, sendo que os desvios superiores a esses limites devem ser investigados. Ainda de acordo com as diretrizes da instituição, deve-se buscar a equidade da distribuição das medições abaixo e acima da curva-chave. Diante disto e das constatações efetuadas, optou-se por consistir as curvas de descarga de ambas as estações fluviométricas para a obtenção de séries de vazões mais acuradas.

A consistência das curvas-chave foi realizada conforme os critérios preconizados por Lopes et al. (2013) e as recomendações de ANA (2011). O método adotado compreendeu, inicialmente, relacionar todas as medições de descarga e ajustar uma curva a partir da Equação 4.1, buscando-se a uniformidade da distribuição das medições em torno da curva-chave. Observando-se as tendências existentes no gráfico dos desvios entre as medições e as vazões calculadas em relação ao tempo, as medições foram divididas em períodos. Para cada período, foram ajustadas novas curvas-chave, por faixas de valores de cotas, buscando-se alcançar, em todos os casos, o princípio da equidade de distribuição das medições e a minimização dos erros relativos.

A FIGURA 8 e a FIGURA 10 apresentam, respectivamente, as curvas de descarga consistidas das estações Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000). Os erros relativos de cada validade podem ser observados na FIGURA 9, na FIGURA 11 e na TABELA 13.

FIGURA 8 – Curva de descarga consistida da estação Fazendinha (65010000), destacando os diferentes períodos de validade e a maior magnitude dos erros entre as vazões medidas e calculadas nos ramos baixos, referentes às vazões mínimas e médias.

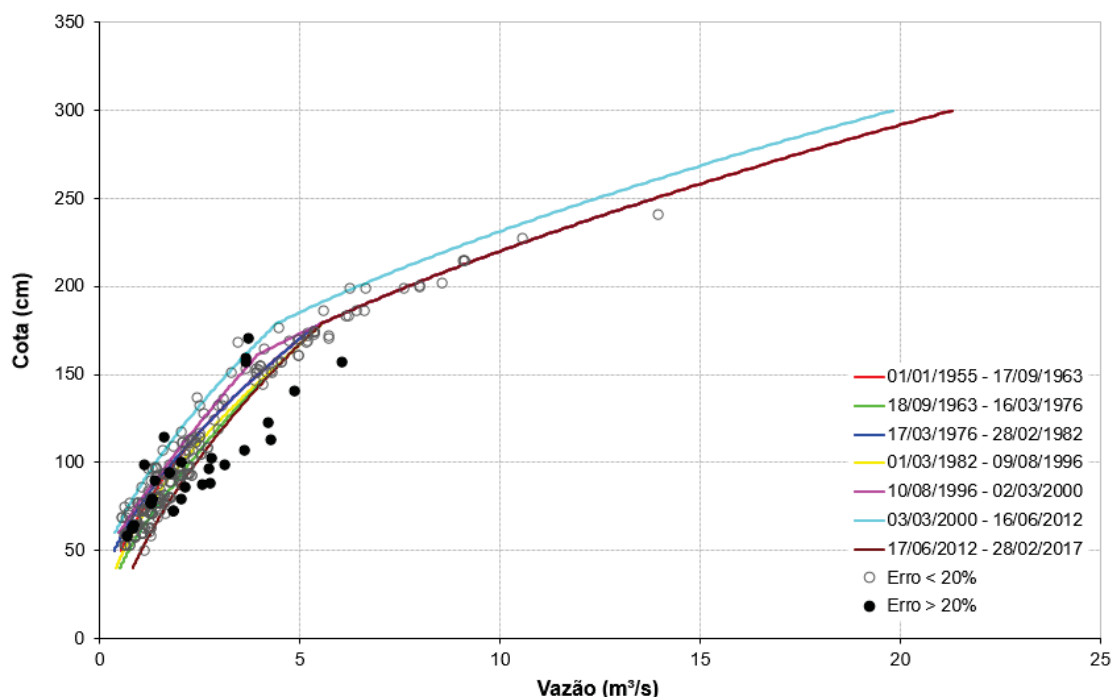


FIGURA 9 – Distribuição dos desvios em relação ao tempo da curva de descarga consistida da estação Fazendinha (65010000) para diferentes períodos de validade. As linhas horizontais em destaque marcam os limites de 10% e 20% dos desvios, considerados satisfatórios e aceitáveis, respectivamente. Os gráficos boxplot mostram que as medições estão, de modo geral, equitativamente distribuídas em torno da curva-chave e que os desvios encontram-se majoritariamente dentro dos limites adequados.

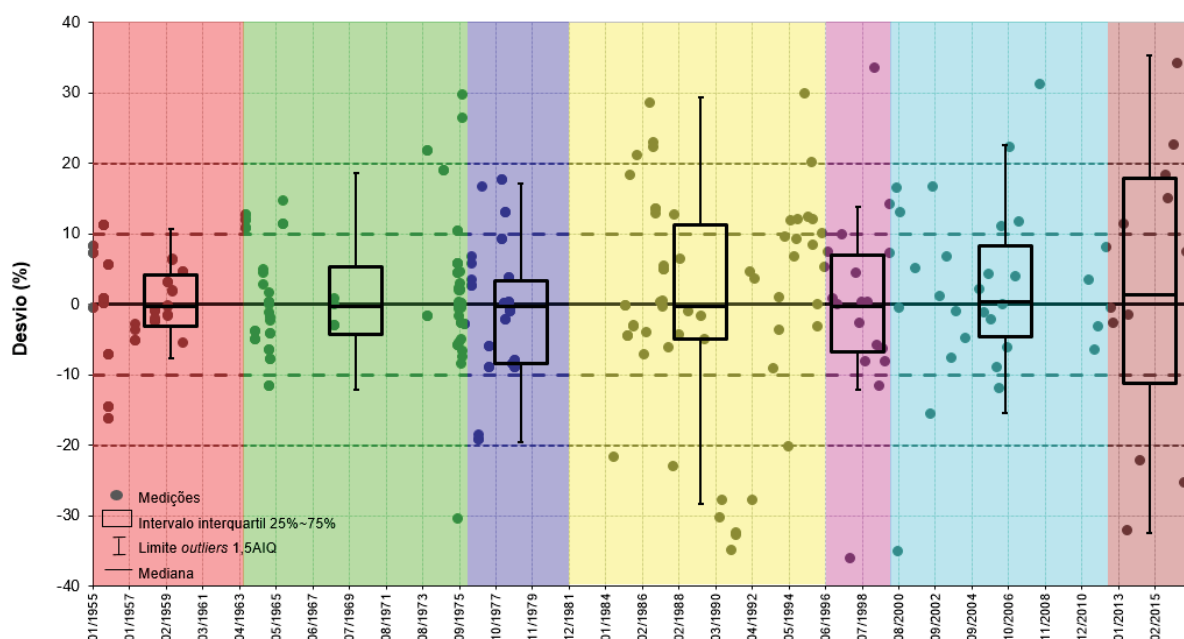


FIGURA 10 – Curva de descarga consistida da estação Porto Vitória (65365000), por períodos de validade, destacando os maiores erros nas vazões baixas. As medições incompatíveis com a tendência das demais do ramo alto, marcadas com um "X", foram analisadas individualmente, constando-se terem sido realizadas em um único evento, sendo, portanto, desconsideradas para fins de traçado da curva-chave pela não representatividade do comportamento hidrológico.

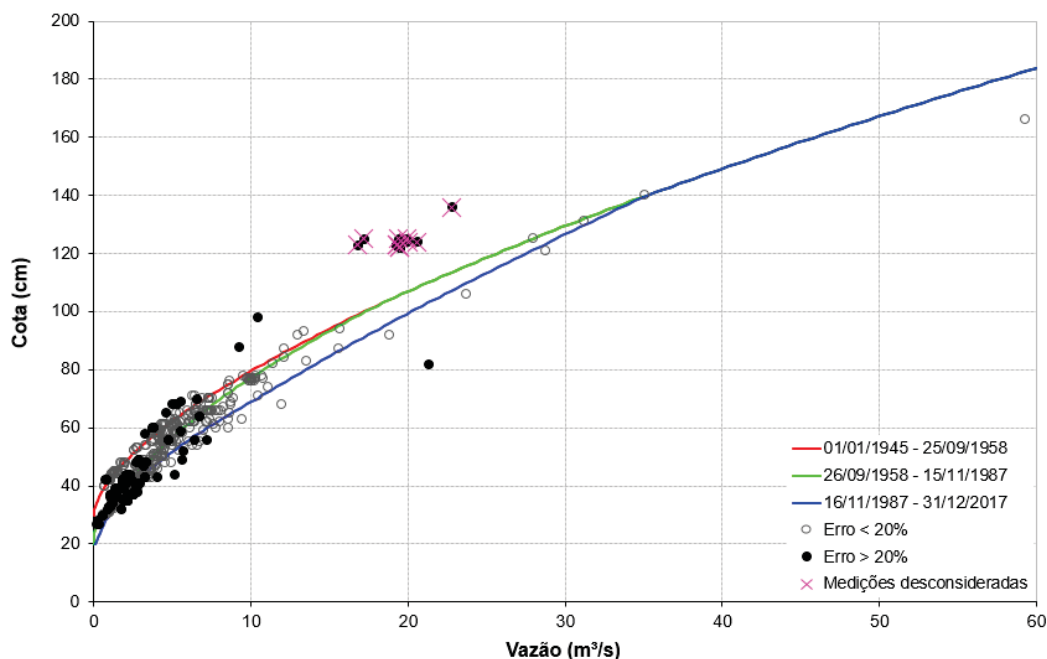


FIGURA 11 – Distribuição dos desvios em relação ao tempo da curva de descarga consistida da estação Porto Vitória (65365000) para os períodos de validade. Os gráficos boxplot mostram a distribuição equitativa das medições em torno da curva-chave e os desvios majoritariamente dentro dos limites aceitáveis, de até 20%. O período de validade de 26/09/1958 a 15/11/1987 apresentou medições com grande dispersão, porém a partir da análise conjunta com os demais registros dessa validade observou-se que se tratavam de uma grande quantidade de eventos pontuais, não sendo pertinente a sua segmentação em mais períodos.

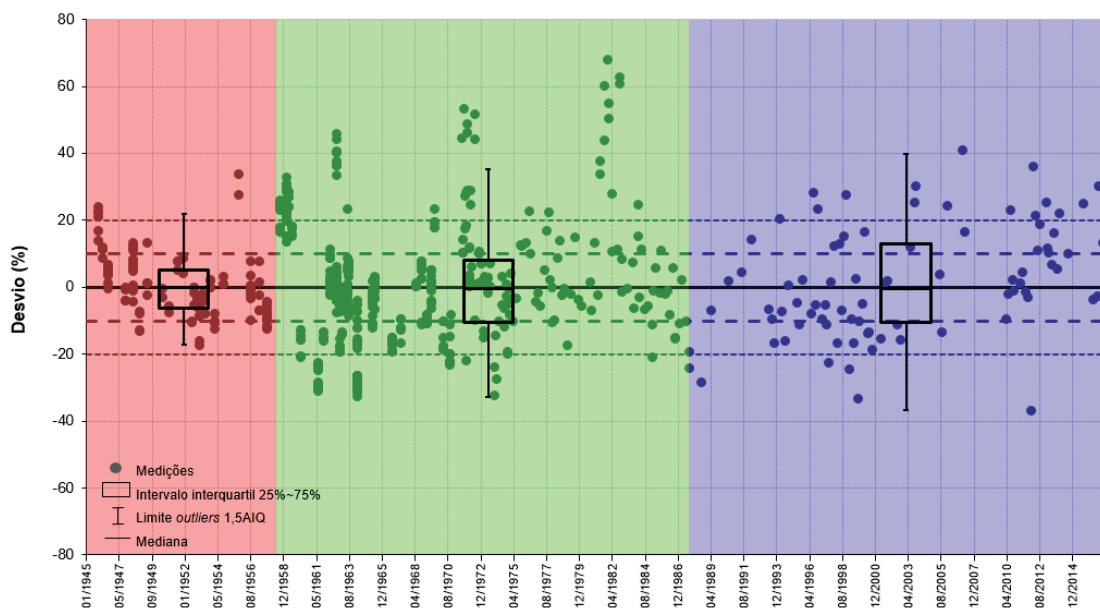


TABELA 13 – Desvios médios entre as medições e as vazões calculadas pelas curvas de descarga consistidas

Estação	Período de validade	Erro médio relativo (%)
Fazendinha (65010000)	01/01/1955 a 17/09/1963	5,0
	18/09/1963 a 16/03/1976	6,6
	17/03/1976 a 28/02/1982	7,3
	01/03/1982 a 09/08/1996	11,5
	10/08/1996 a 02/03/2000	8,7
	03/03/2000 a 16/06/2012	9,0
	17/06/2012 a 28/02/2017	16,1
Porto Vitória (65365000)	01/01/1945 a 25/09/1958	7,1
	26/09/1958 a 15/11/1987	12,8
	16/11/1987 a 31/12/2017	13,9

Ambas as curvas de descarga traçadas são unívocas e com baixa instalabilidade geométrica. Os erros das curvas de descarga consistidas atendem, em geral, à precisão recomendada por ANA (2011). Os maiores erros relativos estão concentrados, em sua maioria, no ramo baixo das curvas, de modo que as maiores incertezas são refletidas nas vazões baixas.

4.1.3 Cotas

A partir da análise do cotagrama da estação é possível observar a presença de erros grosseiros e de transcrição (LOPES et al., 2013), assim como a reinstalação ou alteração dos referenciais da régua linimétrica ou mudança de local da seção de medição.

A série de cotas das estações selecionadas se estendem até meados de 2017, compreendendo registros com *status* brutos e consistidos, sendo a extensão dos registros consistidos apenas até 30/06/2005 para ambas. De modo a abranger o maior período possível, além de incluir períodos mais recentes, foram adotados os dados de cota consistidos até 30/06/2005, complementando-se o restante da série com os dados brutos.

Para subsidiar o uso dos dados brutos sem detrimento à qualidade da informação hidrológica, ademais da análise visual do cotagrama realizou-se uma análise dos registros corrigidos, envolvendo a comparação entre os valores brutos e consistidos para o período comum entre esses, a verificação de períodos sequenciais de alteração e a posição dos valores alterados em relação à média. A TABELA 14 sumariza os resultados dessa análise.

TABELA 14 – Análise das cotas brutas e consistidas. Dentre as correções, a maioria foi realizada nas vazões baixas. Alterações sequenciais foram observadas somente em maio de 1999 para a estação Fazendinha (65010000), podendo esse período ser descartado da seleção dos eventos de cheia. Já no caso da estação Porto Vitória (65365000), alterações sequenciais foram observadas ao longo da série entre 1976 e 2000. No entanto, a diferença entre os valores brutos e consistidos foi, em mais de 90% dos casos, de 1 cm, não implicando, na prática, em alterações nas vazões calculadas.

Local	Período de dados	Cotas alteradas	Cotas alteradas acima da média
Fazendinha (65010000)	20/01/1955 a 30/06/2005	0,8%	28%
Porto Vitória (65365000)	01/01/1976 a 30/06/2005	31%	36%

Da análise do cotograma e de acordo com os resultados da TABELA 14 as cotas brutas foram consideradas adequadas para serem utilizadas no período de 2005 a 2017, referente à inexistência de dados consistidos da ANA.

4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

A consistência de dados pluviométricos é, via de regra, mais complexa, devido à variabilidade e independência espacial das chuvas. No entanto, pode-se utilizar a análise comparativa entre estações próximas, bem como a curva duplo-acumulativa para identificar e corrigir alguns erros nos registros de chuva (SANTOS et al., 2001).

Dessa maneira, eventuais inconsistências nos dados pluviométricos foram buscadas a partir das curvas duplo e uni-acumulativas das estações selecionadas e da comparação dos pluviogramas simultâneos.

A curva duplo-acumulativa é obtida grafando-se as chuvas médias diárias acumuladas de uma estação contra outra ou a média de várias estações no período comum de dados. Como resultado, tem-se uma reta, na qual variações na inclinação indicam alterações nos dados de alguma das estações, tais como mudança de local de instalação e problemas na regulagem, exposição ou calibração dos equipamentos de medição (SANTOS et al., 2001). A curva uni-acumulativa é obtida de maneira similar, porém plotando-se as chuvas médias diárias acumuladas de uma estação contra o período de tempo dos próprios dados. A FIGURA 12, FIGURA 13 e FIGURA 14 apresentam a curva uni-acumulativa das estações Fazendinha (2549017), Mananciais da Serra (2548041) e Usina Bituruna (2651015), respectivamente.

FIGURA 12 – Curva uni-acumulativa da estação Fazendinha (2549017)

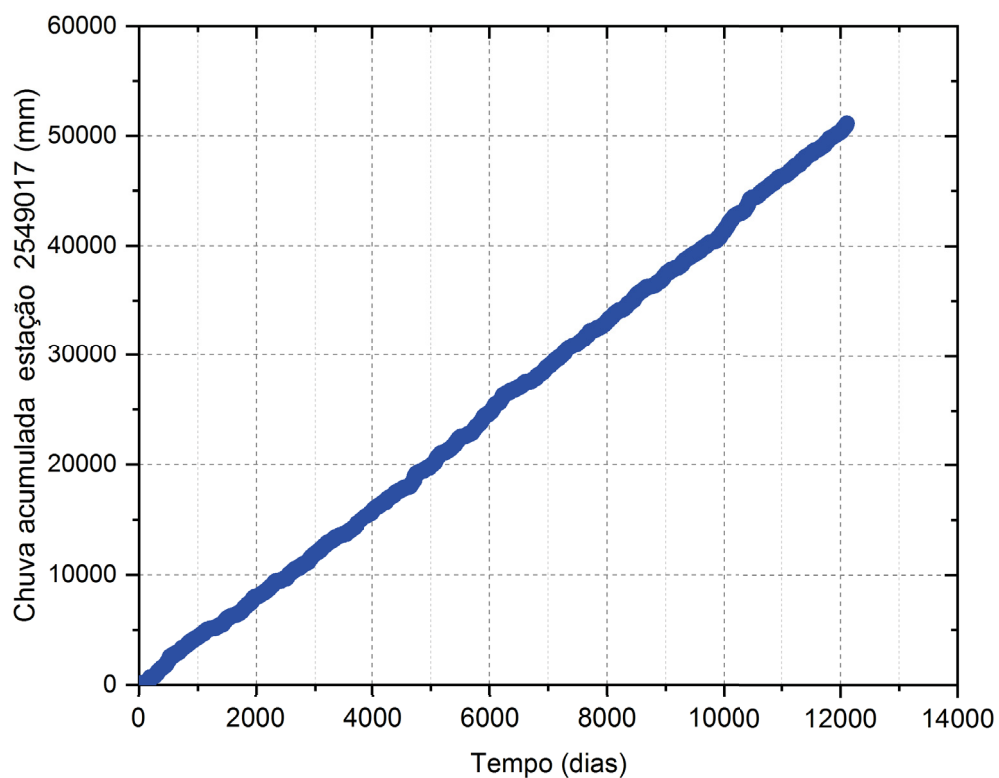


FIGURA 13 – Curva uni-acumulativa da estação Mananciais da Serra (2548041). Nota-se a existência de uma alteração de tendência nos dados desta estação.

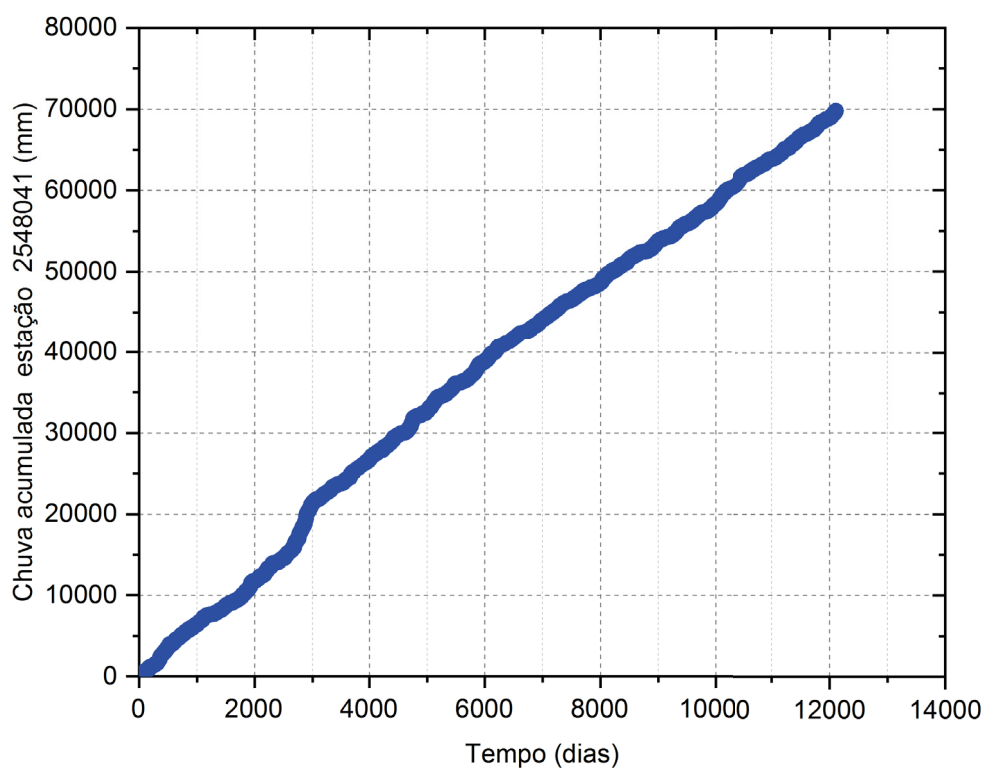
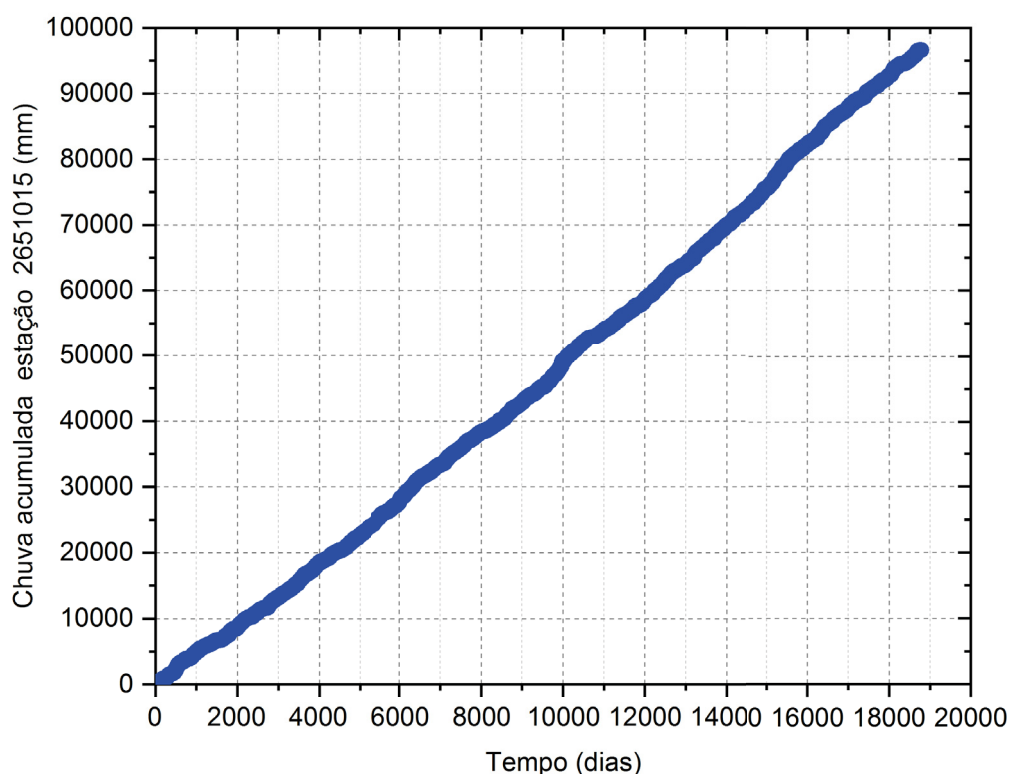


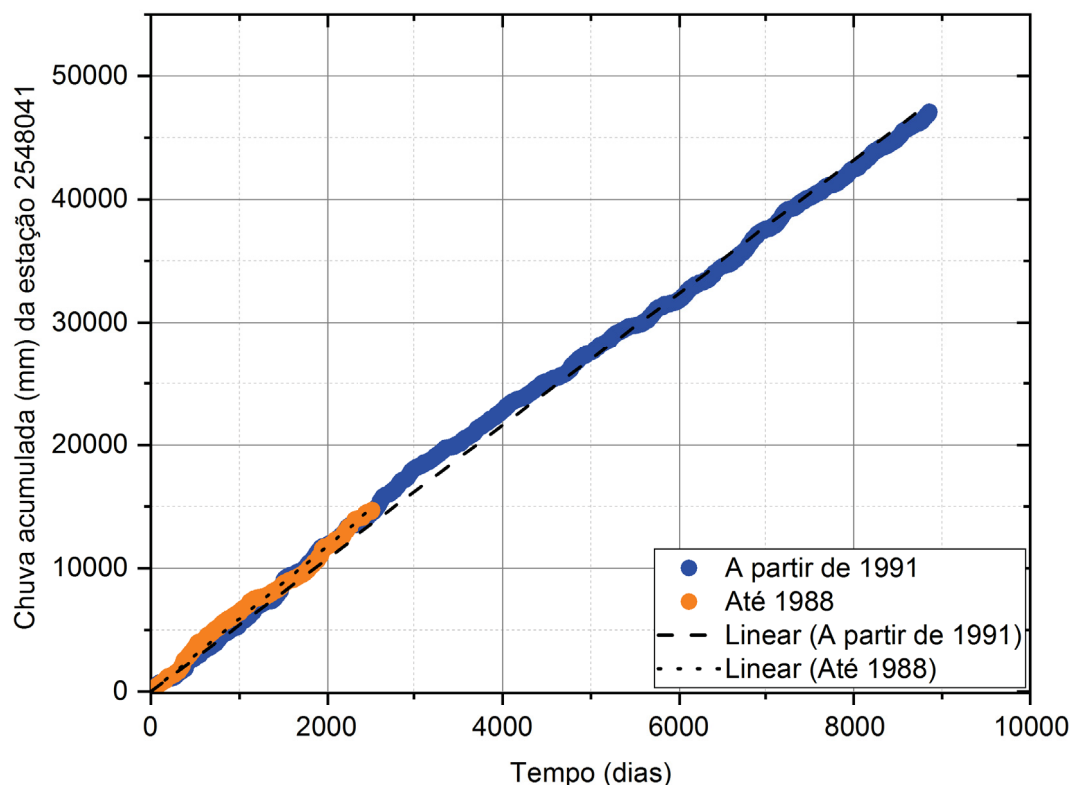
FIGURA 14 – Curva uni-acumulativa da estação Usina Bituruna (2651015)



Diante da alteração de tendência constatada nos dados da estação Mananciais da Serra (2548041), esses foram analisados, tendo sido observados, nos anos 1989 e 1990, valores médios diários muito elevados em datas consecutivas ou muito próximas e que não constam na série da estação Fazendinha (2549017), próxima ao local da primeira. Essa situação também foi verificada a partir da análise visual dos pluviogramas simultâneos.

A título de verificação, as curvas duplo e uni-acumulativas foram plotadas novamente, excluindo-se os anos 1989 e 1990. Nesse caso, foi constatado que a alteração de tendência nas curvas da estação Mananciais da Serra (2548041) foi eliminada. A FIGURA 15 apresenta as curvas uni-acumulativas para essa estação para os períodos anterior a 1989 e posterior a 1990.

FIGURA 15 – Curvas uni-acumulativas da estação Mananciais da Serra (2548041) excluindo-se os anos 1989 e 1990. Ademais da inexistência de viés, nos períodos anterior e posterior aos anos excluídos as retas resultantes apresentaram a mesma inclinação, indicando se tratar de uma alteração pontual dos dados no período em questão.



Dada a grande variabilidade temporal e espacial dos eventos de chuva em escala diária e o reflexo na forma de incertezas ao se tentar corrigir os dados, optou-se por descartar os anos de 1989 e 1990 da posterior seleção dos eventos chuva-vazão.

4.3 DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE VAZÃO

A partir das curvas de descarga e das cotas consistidas foram determinadas as séries de vazões utilizadas neste estudo. As falhas não foram preenchidas, visando a não incorporação de outras fontes de incertezas nos dados.

A TABELA 15 apresenta as principais informações hidrológicas das séries de vazões determinadas para as estações Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000), e compara-as com as séries originais da ANA.

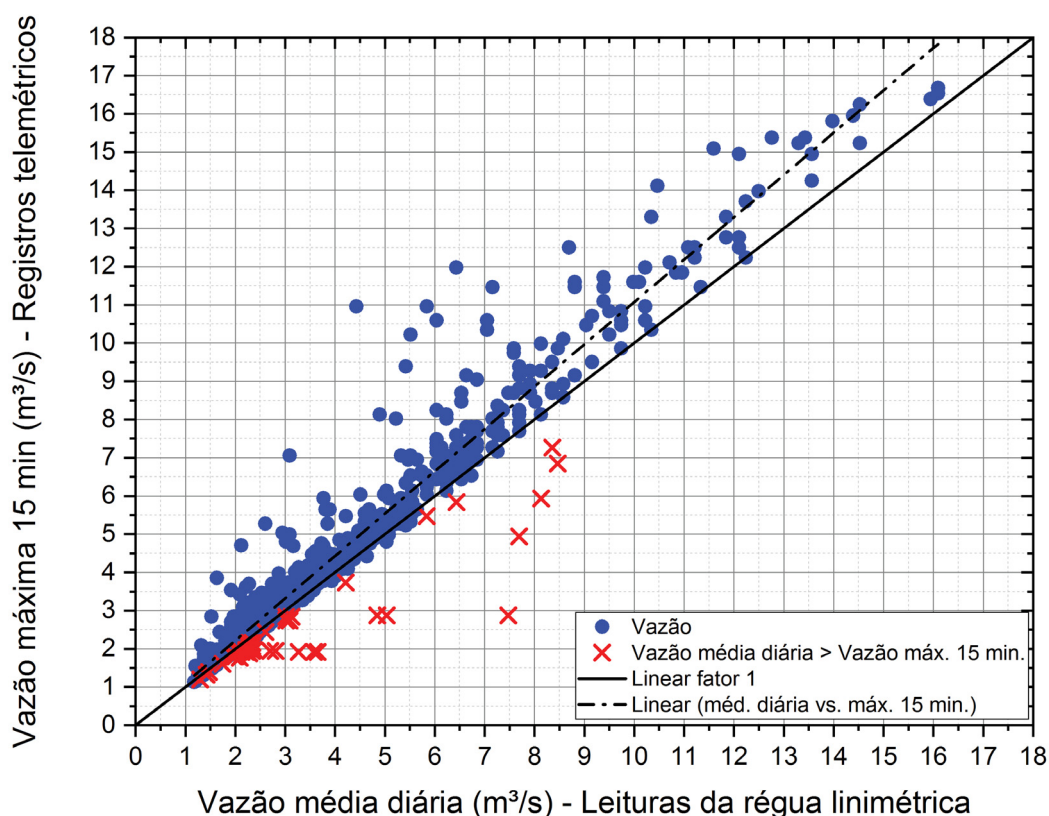
TABELA 15 – Informações hidrológicas das séries de vazões determinadas para as estações fluviométricas em estudo

Local	Fonte	Período	Número de anos	Vazão (m ³ /s)		
				Média	Máxima	Mínima
Fazendinha (65010000)	Consistência	28/01/1955 28/02/2017	63	2,8	17,9	0,4
	ANA	28/01/1955 31/12/2010	56	3,1	19,0	0,5
Porto Vitória (65365000)	Consistência	19/11/1945 31/12/2010	66	5,3	146,9	0,02
	ANA	19/11/1945 31/03/2017	73	5,9	596,2	0,07

Cabe ressaltar que a análise de disponibilidade e de consistência de dados das estações fluviométricas foi realizada na escala das duas leituras diárias da régua linimétrica, conforme disponibilidade para ambas as estações e por serem, ainda, a base para estudos hidrológicos no Brasil. Contudo, de acordo com Fill e Steiner (2003), no caso das bacias hidrográficas pequenas a diferença entre a vazão máxima média diária e a vazão máxima instantânea, ocorrida fora dos horários de coleta de dados, pode ser expressiva. Dessa forma, visando verificar a representatividade das vazões de pico dos eventos de cheia dos dados diários, realizou-se uma análise comparativa entre a vazão proveniente das duas leituras diárias e a vazão máxima a cada 15 minutos para cada dia, proveniente dos dados telemétricos obtidos da ANA, para o período de 2013 a 2017 da estação Fazendinha (65010000), que dispunha da segunda informação.

Inicialmente, os fluviogramas médio diário e máximo a cada 15 minutos foram plotados simultaneamente, conforme apresentado no APÊNDICE D, para uma avaliação visual. Na sequência, foi avaliada a regressão linear entre as vazões média diária e máxima a cada 15 minutos para determinação do fator médio de majoração da vazão de pico. A FIGURA 16 mostra o gráfico de regressão.

FIGURA 16 – Regressão linear entre as vazões média diária e máxima a cada 15 minutos. O fator de majoração da vazão de pico obtido resultou igual a 1,1076. Isso indica que as vazões máximas instantâneas são, em média, aproximadamente 10% superiores às vazões médias diárias. Os dias nos quais a vazão média foi superior à vazão máxima com diferença maior que 5% foram considerados inconsistentes e, embora apresentados no gráfico, destacados abaixo da reta com coeficiente angular igual a 1, não foram utilizados na determinação do fator de pico.



Ainda como parte da análise foi calculado o erro médio entre ambas as vazões, para todo o período disponível e, em outra abordagem, apenas para os valores superiores à vazão média de longo termo, determinando-se também a máxima diferença encontrada nas conjunturas de comparação. Os resultados são apresentados na TABELA 16.

TABELA 16 – Comparação entre as vazões média diária e máxima a cada 15 minutos. As diferenças relacionadas à discretização temporal são, em média, da ordem de 10%. Por outro lado, diferenças da ordem de 100% estão, em geral, relacionadas a eventos de cheia que se iniciaram após a leitura das 17 horas, de modo que os valores máximos foram refletidos no dia posterior, não havendo perda de informação na magnitude da vazão de pico.

Erro médio		Diferença máxima		Erro médio vazões máximas	
(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)
0,37	10	-6,53	-148	0,60	14

Novamente visando a não incorporação de outras fontes de incertezas nos dados, considerou-se os dados das duas leituras diárias adequados para a determinação das vazões de pico, não sendo adotado o fator de majoração. Além disso, os dados telemétricos possuem uma série bastante reduzida, de 2013 a 2017, além de muitas falhas e dados notoriamente espúrios em alguns períodos, inviabilizando, por ora, sua utilização em estudos hidrológicos.

4.4 DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE CHUVA

A chuva média em uma bacia hidrográfica pode ser estimada de diversas maneiras, dentre as quais o método dos polígonos de Thiessen é um dos mais utilizados (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Nesse método, a chuva média é calculada a partir da média ponderada entre as chuvas das estações pluviométricas e suas respectivas áreas de influência na bacia. Conforme apresentado anteriormente, os polígonos de Thiessen foram traçados para a seleção das estações pluviométricas que possuem influência nas áreas de estudo.

No caso da bacia hidrográfica da estação fluviométrica Porto Vitória (65365000), como apenas a estação pluviométrica Usina Bituruna (2651015) possui influência na bacia, adotou-se diretamente a série de chuvas dessa estação. Já a série de chuva média diária na bacia da estação fluviométrica Fazendinha (65010000) foi calculada a partir da média ponderada das chuvas diárias das estações pluviométricas Fazendinha (2549017) e Mananciais da Serra (2548041), considerando suas áreas de influência sobre a bacia, apresentadas anteriormente na TABELA 3. Quando da ausência de dados em uma das estações, adotou-se diretamente o valor da outra estação. Destaca-se que a chuva média mensal na estação Mananciais da Serra (2548041), localizada na cabeceira da bacia, é cerca de 35% superior à da estação Fazendinha (2549017), em especial nos meses mais chuvosos, janeiro a abril, com valores mais próximos uma da outra nos meses de junho a agosto.

4.5 SELEÇÃO DOS EVENTOS DE CHUVA E VAZÃO

A chuva de projeto tem como objetivo a geração de um hidrograma ou vazão de projeto para uma determinada seção em uma bacia hidrográfica. As intensidades das chuvas de projeto estão relacionadas a eventos extremos e a seus respectivos tempos de recorrência (BEMFICA et al., 2000). Na modelagem chuva-vazão baseada na análise estatística de eventos extremos assume-se que o tempo de recorrência da chuva de projeto é igual ao do hidrograma gerado (CANHOLI, 2005).

Para a análise dos tempos de recorrência seleciona-se o maior evento ocorrido em cada ano da série, ordenando-o de forma decrescente e associando um número

de ordem que varia de 1 a N , sendo N o número de anos da série. A frequência F com que um valor de ordem M dentro da série anual é igualado ou superado pode ser calculada pelo método do Kimbal (PINTO et al., 1976), dado pela equação

$$F = \frac{M}{N + 1} \quad (4.2)$$

O tempo de recorrência (TR) é determinado como o inverso da frequência

$$TR = \frac{1}{F} \quad (4.3)$$

Para a definição das chuvas de projeto das séries consideradas, inicialmente realizou-se a análise de frequência das chuvas máximas anuais, a fim de se estipular um valor de referência acima do qual fossem buscados os eventos de interesse. O valor de referência adotado foi de 70 mm para a estação Fazendinha (65010000) e de 80 mm para a estação Porto Vitória (65365000), associados à recorrência de aproximadamente 2 anos. Ainda com base nas séries de frequência empíricas, foram mapeados os valores de chuva referentes a diferentes recorrências, para permitir posteriormente a análise dos resultados dos HUS simulados para as diferentes magnitudes dos eventos de chuva.

A partir dos valores mapeados e dos dados de chuva e de vazão plotados simultaneamente em relação ao tempo, foram analisados e selecionados os eventos para estudo, considerando-se uma combinação de: i) eventos de chuva isolados, em cujos períodos imediatamente precedentes e posteriores, outras precipitações não tenham gerado um hidrograma de cheia, e ii) hidrogramas resultantes bem definidos, em termos de ascensão, pico e recessão.

Ademais desses critérios, a seleção dos eventos também levou em consideração a localização temporal das falhas nas séries de chuvas e vazões, dos dados de cotas corrigidos nas séries de vazões determinadas e dos dados espúrios da série de chuvas da estação Mananciais da Serra (2548041). A TABELA 17 apresenta as principais informações dos eventos selecionados. Os gráficos são apresentados no APÊNDICE E.

TABELA 17 – Eventos de chuva e vazão selecionados

Evento	Período	Chuva máxima (mm)	Vazão máxima (m³/s)	Duração escoamento direto (dia)	Total chuva (10 ⁶ m³)	Total vazão (10 ⁶ m³)	α
Fazendinha (65010000)							
1	12/04/1955 a 20/04/1955	72	3,8	8	11,97	0,49	0,04
2	01/03/1977 a 10/03/1977	74	10,0	9	13,58	1,32	0,10
3	17/12/1972 a 28/12/1972	80	13,8	11	17,67	2,17	0,12
4	03/01/1973 a 10/01/1973	81	10,0	7	15,04	1,93	0,13
5	17/05/1981 a 23/05/1981	85	4,0	6	15,86	0,61	0,04
6	09/12/1957 a 16/12/1957	86	5,1	7	10,92	0,49	0,05
7	17/01/1977 a 24/01/1977	86	8,8	7	15,52	2,00	0,13
8	12/06/1987 a 20/06/1987	86	11,0	8	15,86	2,40	0,15
9	18/05/1983 a 25/05/1983	87	12,8	7	11,52	2,41	0,21
10	20/02/1955 a 25/02/1955	98	4,5	5	11,34	0,56	0,05
11	30/10/1958 a 06/11/1958	94	14,9	7	15,33	2,34	0,15
12	12/05/1993 a 19/05/1993	91	9,0	7	11,20	1,90	0,17
13	27/03/1981 a 03/04/1981	90	5,8	7	14,91	1,16	0,08
14	26/10/1981 a 05/11/1981	107	14,1	10	31,88	2,59	0,08
15	19/06/2013 a 26/06/2013	110	16,7	7	20,30	3,39	0,17
16	21/05/1988 a 28/05/1988	127	10,7	7	16,47	1,96	0,12
17	14/05/1976 a 20/05/1976	157	12,8	6	29,67	2,17	0,07
Porto Vitória (65365000)							
1	19/05/2005 a 22/05/2005	83	69,0	3	11,92	9,73	0,82
2	26/09/1972 a 05/10/1972	85	92,5	9	12,05	16,47	*
3	06/10/1999 a 11/10/1999	87	38,8	5	5,67	3,05	0,54
4	12/06/1970 a 18/06/1970	88	37,8	6	7,83	4,39	0,56

Continua na próxima página

TABELA 17 – Eventos de chuva e vazão selecionados

Evento	Período	Chuva máxima (mm)	Vazão máxima (m³/s)	Duração escoamento direto (dia)	Total chuva (10 ⁶ m³)	Total vazão (10 ⁶ m³)	α
5	02/03/1983 a 08/03/1983	88	59,5	6	10,69	8,78	0,82
6	01/05/1989 a 08/05/1989	90	20,9	7	9,15	2,98	0,33
7	09/12/1991 a 12/12/1991	94	22,7	3	6,20	1,88	0,30
8	23/06/1995 a 30/06/1995	97	27,5	7	7,28	3,00	0,41
9	24/09/1984 a 01/10/1984	98	29,8	7	6,75	3,63	0,54
10	02/09/1957 a 07/09/1957	100	39,4	5	8,97	6,60	0,74
11	18/09/1962 a 24/09/1962	100	27,5	6	8,78	5,08	0,58
12	29/12/2003 a 04/01/2004	101	31,7	6	8,66	2,60	0,30
13	19/06/1997 a 23/06/1997	107	40,4	4	6,96	3,53	0,51
14	02/12/1967 a 06/12/1967	109	40,4	4	10,92	3,83	0,35
15	12/05/1993 a 16/05/1993	124	73,0	4	10,09	8,19	0,81
16	17/05/1983 a 24/05/1983	155	143,4	7	11,69	17,54	*
17	24/04/2007 a 01/05/2007	158	62,0	7	16,60	11,69	0,70

* Para o período selecionado, não foi possível calcular o valor do índice α

Para a análise da adequação dos modelos de HUS conforme a magnitude dos eventos, esses foram organizados em grupos, de acordo com a recorrência da chuva máxima, para cada área de estudo. A TABELA 18 mostra o agrupamento realizado.

TABELA 18 – Agrupamento dos eventos selecionados conforme o tempo de recorrência

Tempo de recorrência (anos)	Número do evento	
	Fazendinha (65010000)	Porto Vitória (65365000)
TR 2	1 a 9	1 a 9
TR 5	10 a 13	10 a 14
TR 10	14 a 16	15
TR 50	17	16 e 17

Para cada grupo foi selecionado da série empírica de chuvas máximas o valor representativo daquele tempo de recorrência para ser utilizado como entrada no modelo. Primeiramente, rodou-se o *software* HEC-HMS com as precipitações máximas

representativas de cada tempo de recorrência, selecionando-se no modelo o método do CN para a estimativa da chuva efetiva. Posteriormente, também foi utilizada como entrada no modelo a chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto para cada evento, para comparação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

“To advance the knowledge base of scientific hydrology and to answer many of the questions of environmental management we have to better exploit the information that resides in the myriad of patterns observable in nature.”

Grayson e Blöschl (2000)

Apresenta-se neste capítulo os resultados do estudo realizado, incluindo: comparação dos hidrogramas simulados pelos três métodos de HUS analisados e abordagens conservadora e arrojada, análise de incerteza dos resultados obtidos nas vazões de pico simuladas e observadas, e considerando a estimativa da chuva efetiva pelos métodos do CN e do coeficiente de escoamento direto.

5.1 COMPARAÇÃO DOS ERROS E INCERTEZAS NAS VAZÕES DE PICO DOS HIDROGRAMAS POR MÉTODO DE HUS

A partir das chuvas de projeto para cada tempo de recorrência e das combinações definidas para os parâmetros de entrada (ver TABELA 10 anteriormente) foram simulados os hidrogramas resultantes pelos métodos do HUS de Snyder, SCS e Clark, com auxílio do *software* HEC-HMS.

A análise conjunta dos hidrogramas resultantes, por tempo de recorrência e método de HUS, permitiu que fossem delimitadas curvas limítrofes - caracterizando as abordagens conservadora e arrojada - considerando todas as interseções superiores e inferiores dos hidrogramas, de modo que a região entre as curvas compreendesse os demais resultados das combinações analisadas, possibilitando a percepção da incerteza total.

Da FIGURA 17 até a FIGURA 24 apresenta-se as curvas limítrofes das combinações analisadas, por tempo de recorrência da chuva de projeto, para as bacias hidrográficas das estações Fazendinha (65010000) e Porto Vitória (65365000). Tais curvas foram ainda comparadas com os hidrogramas de escoamento direto observados.

FIGURA 17 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 2 anos da chuva de projeto

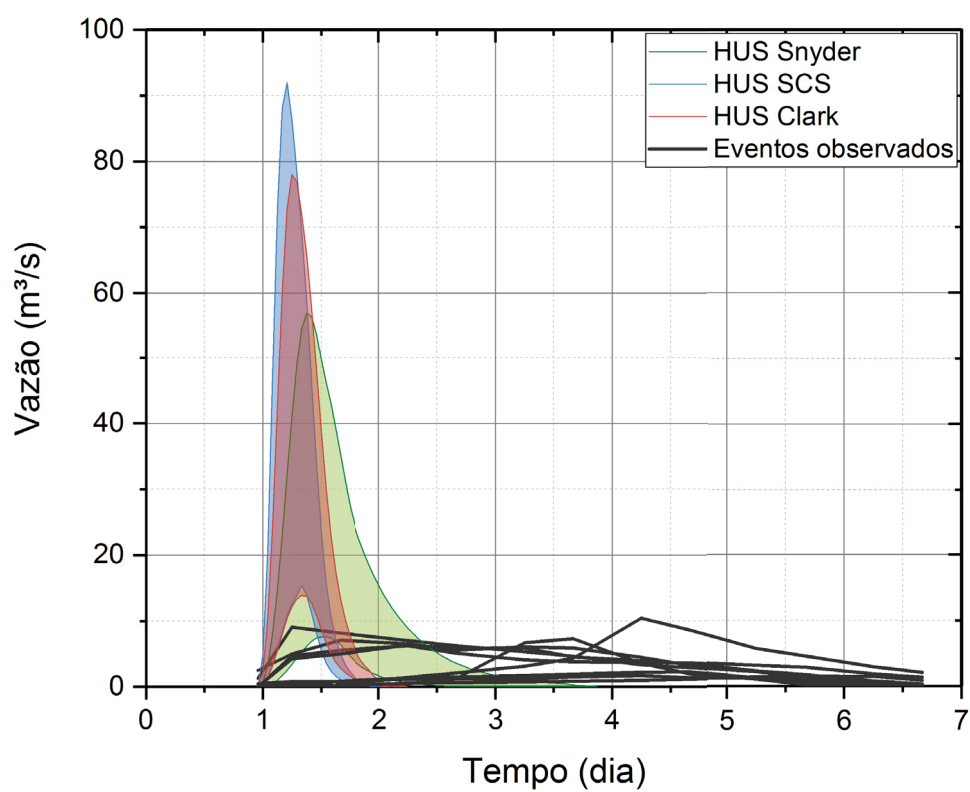


FIGURA 18 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 5 anos da chuva de projeto

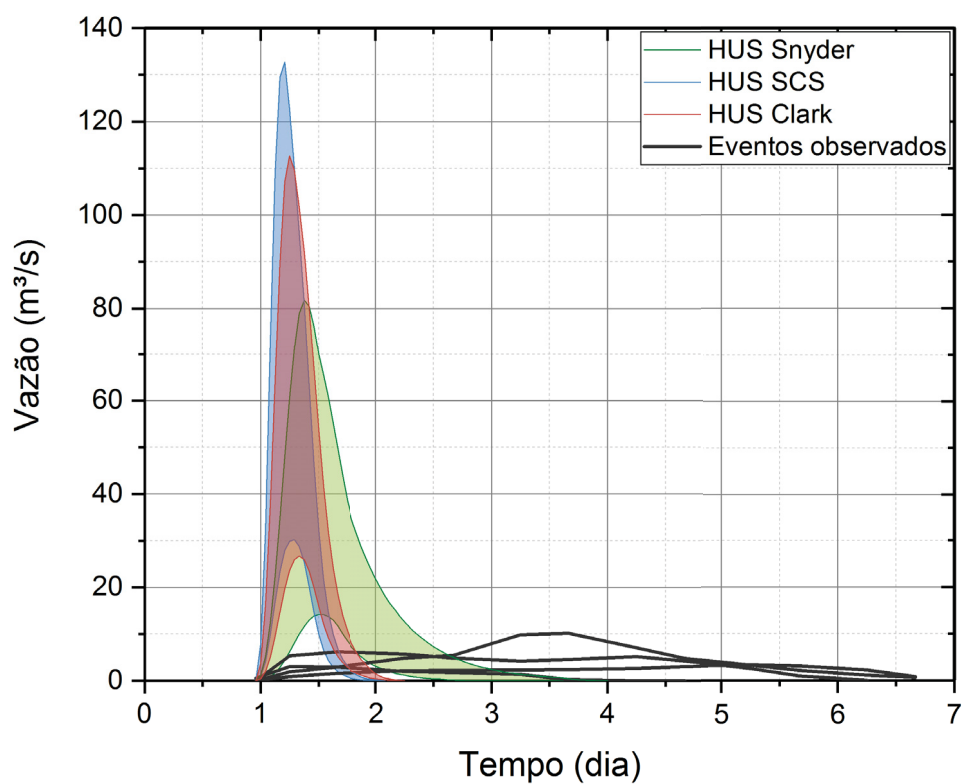


FIGURA 19 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 10 anos da chuva de projeto

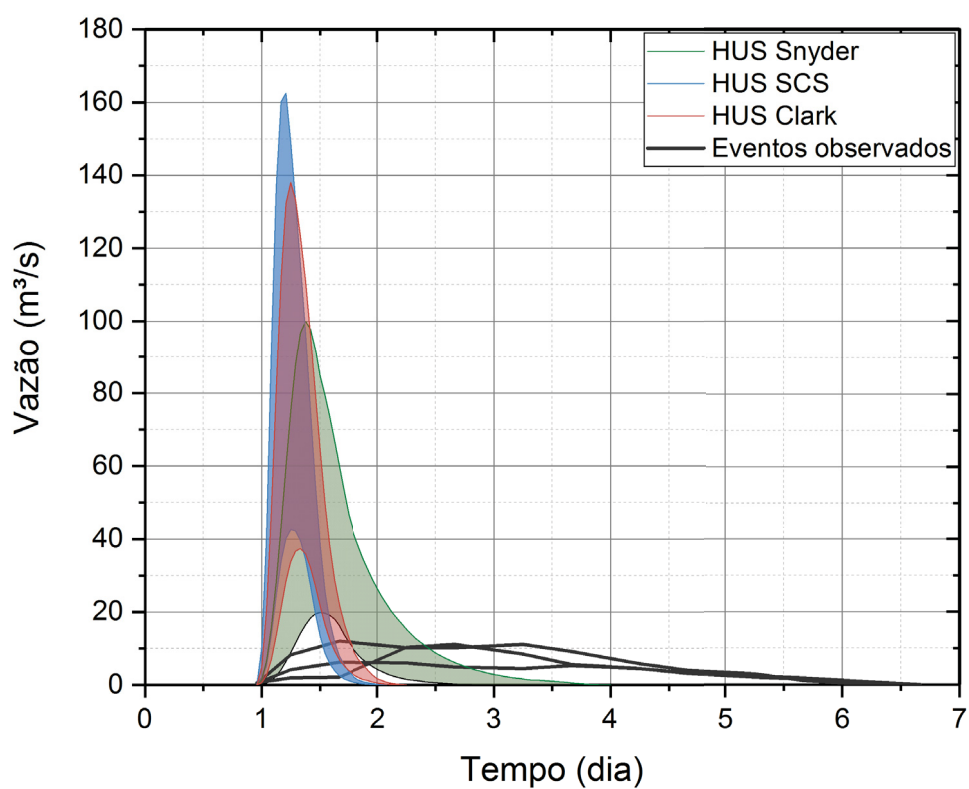


FIGURA 20 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Fazendinha (65010000) para TR 50 anos da chuva de projeto

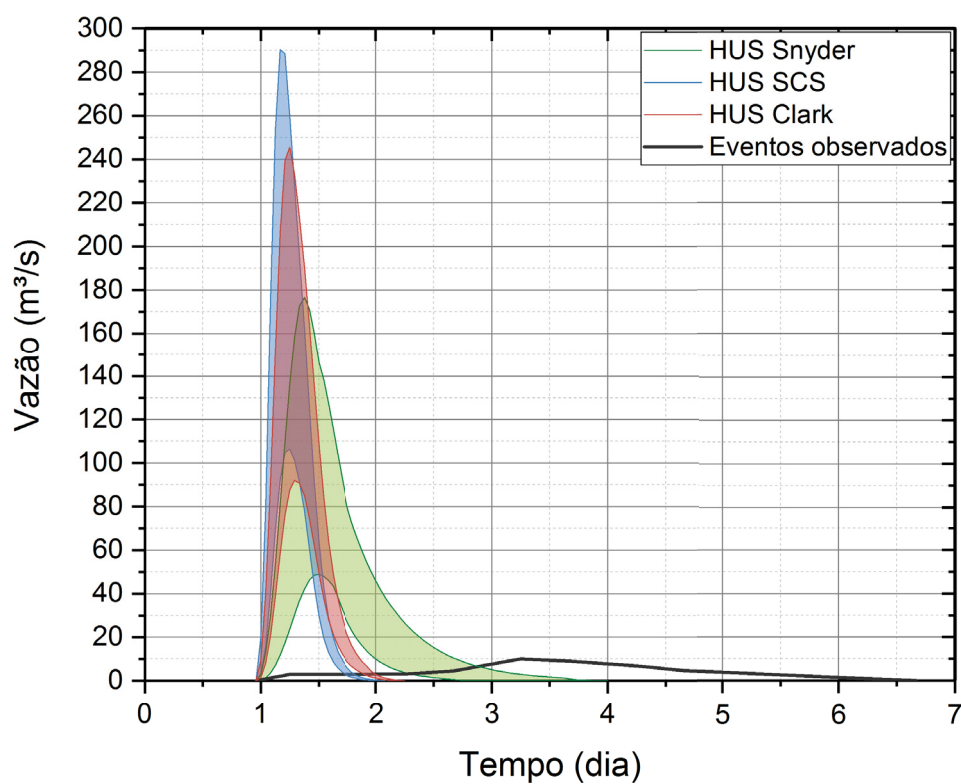


FIGURA 21 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 2 anos da chuva de projeto

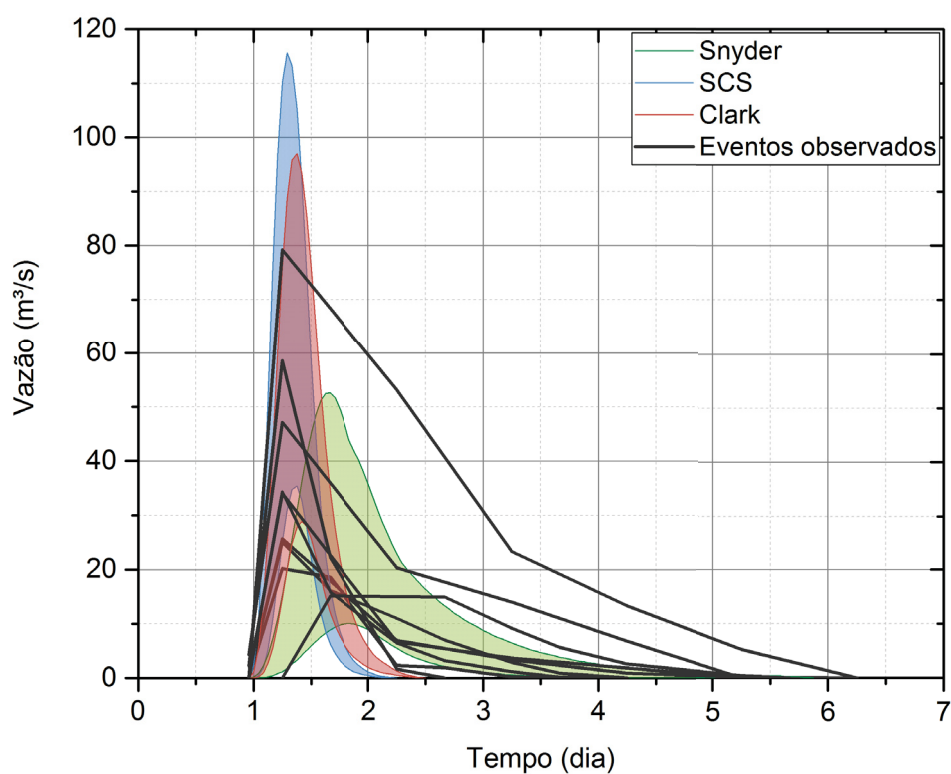


FIGURA 22 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 5 anos da chuva de projeto

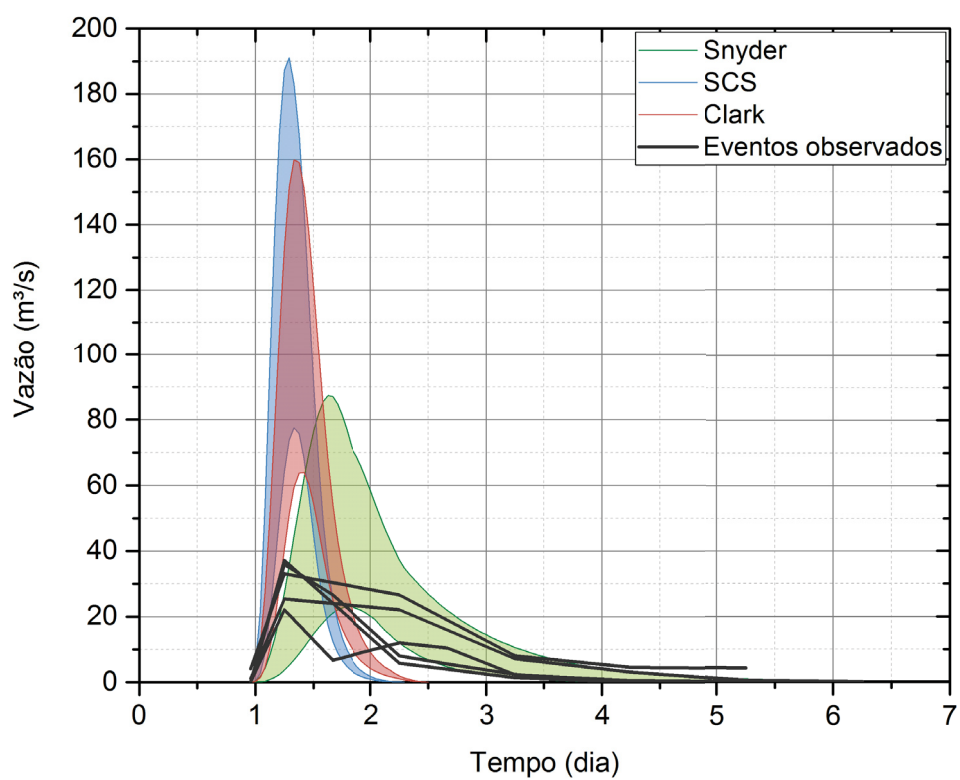


FIGURA 23 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 10 anos da chuva de projeto

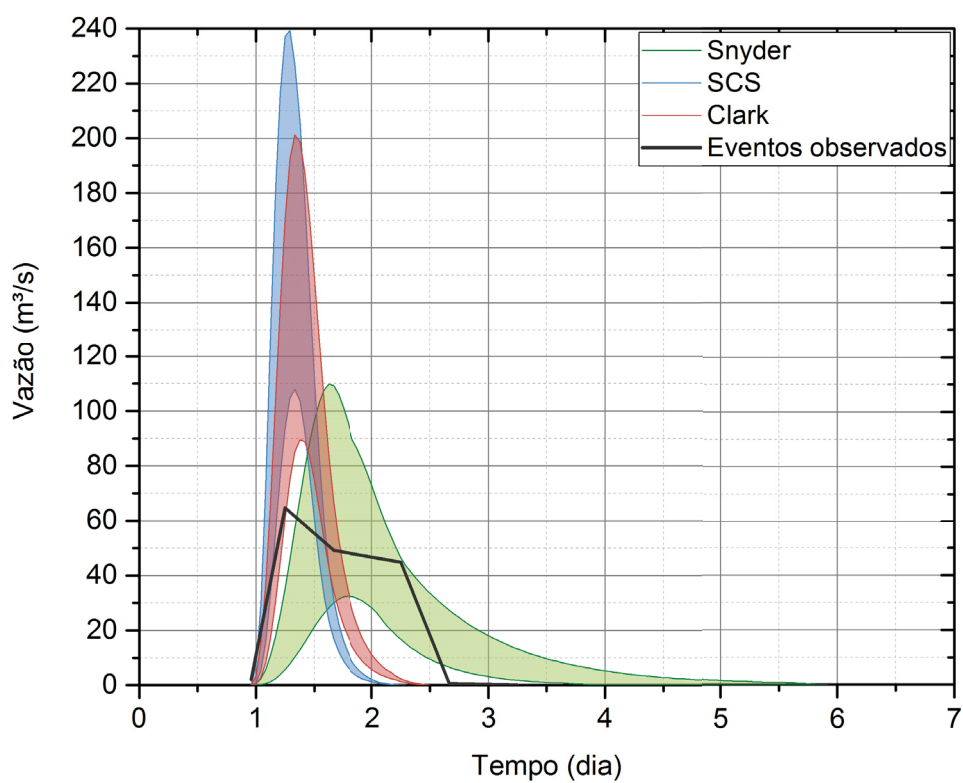
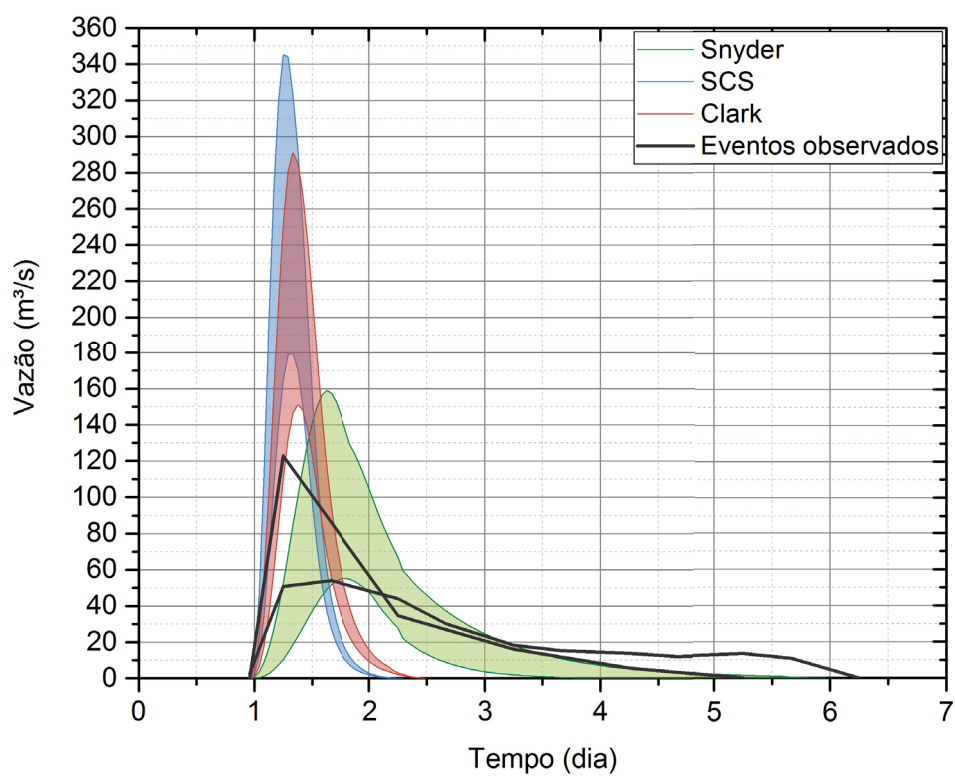


FIGURA 24 – Hidrogramas simulados e observados para a estação Porto Vitória (65365000) para TR 50 anos da chuva de projeto



Os hidrogramas simulados não foram representativos dos hidrogramas reais, tanto em termos de vazões de pico quanto de características, tais como tempo de pico, ascensão, recessão e duração do escoamento. Os modelos simularam hidrogramas mais rápidos e acentuados do que os eventos reais. No caso da estação Fazendinha (65010000), os tempos de base dos hidrogramas resultantes foram de aproximadamente um dia para métodos do SCS e Clark e de três dias para o método de Snyder, enquanto os eventos reais apresentaram tempo de base de cerca de cinco a seis dias. Similarmente, para a estação Porto Vitória (65365000), os tempos de base dos hidrogramas resultantes foram de aproximadamente um dia para os métodos do SCS e Clark e de dois dias para o método de Snyder, e os hidrogramas reais de quatro a seis dias.

Os valores das vazões de pico simuladas (Q_{sim}), das vazões de pico observadas (Q_{obs}) e os erros, na forma da relação entre estas, são apresentados no APÊNDICE F.

Para todos os tempos de recorrência analisados, o HUS do SCS resultou nas maiores vazões de pico e o HUS de Snyder nas menores vazões. Os valores intermediários do HUS de Clark aproximaram-se mais daqueles produzidos pelo primeiro método.

5.2 ADEQUAÇÃO DOS MÉTODOS DE HUS POR TEMPO DE RECORRÊNCIA

No caso da estação Fazendinha (65010000), o método do HUS de Snyder, na abordagem arrojada, foi o único a produzir vazões de pico simuladas inferiores às observadas, de 20% a 30% para dois eventos com tempo de recorrência de 2 anos. Para esses mesmos eventos, a abordagem conservadora resultou em vazões de pico cerca de 400% e 500% superiores, respectivamente, evidenciando a discrepância existente entre os erros quando se trata de subestimar ou superestimar a vazão. Na estação Porto Vitória (65365000), na maioria dos casos em que a abordagem arrojada subestimou as vazões de pico, na abordagem conservadora a superestimativa das vazões alcançou maiores magnitudes dos erros, em geral superiores a 100%. Esse resultado se assemelha àquele obtido por Thorvat e Patel (2016), que constataram erros muito maiores nos casos de superestimativas dos modelos de HUS em comparação com os erros quando as vazões de pico simuladas eram inferiores às observadas.

Na abordagem conservadora, as vazões simuladas chegaram a resultar em mais de 50, 40 e 30 vezes superior às vazões observadas, respectivamente para os métodos do SCS, Clark e Snyder, para eventos de tempo de recorrência de 2 anos da chuva de projeto na estação Fazendinha (65010000). No entanto, em média, os maiores erros na abordagem conservadora foram observados para os eventos com recorrência de 5 anos. Cabe destacar que para o evento com tempo de recorrência de

50 anos, mesmo na abordagem arrojada os valores máximos foram cerca de 5 vezes superiores para o HUS de Snyder e de 10 vezes para os HUS do SCS e Clark.

Para a estação Porto Vitória (65365000), o HUS de Snyder produziu, em geral, valores inferiores às vazões observadas para a abordagem arrojada, variando de 30% a 90% inferiores para o tempo de recorrência de 2 anos, de 10% a 40% inferiores para a recorrência de 5 anos, de 50% inferior para 10 anos e de 60% inferior para 50 anos. Adicionalmente, mesmo a abordagem conservadora produziu resultados inferiores às vazões observadas, de 10% e 30%, para eventos com tempo de recorrência de 2 anos. No caso dos métodos do SCS e de Clark, foram observados erros relativos de 20% a 60% inferiores para alguns eventos com recorrência de 2 anos na abordagem arrojada. Com relação aos maiores erros, na abordagem conservadora tanto os maiores erros relativos pontuais quanto os maiores erros relativos médios foram constatados para os eventos com tempo de recorrência de 5 anos.

Cabe ressaltar que a ordem de grandeza de erro considerada aceitável na aplicação de métodos de HUS é de cerca de 30%, na compreensão de Hoffmeister e Weisman (1977).

É importante notar que as magnitudes dos erros para a estação Porto Vitória (65365000) são muito menores em comparação com os resultados obtidos para a estação Fazendinha (65010000), para ambas as abordagens. Nesse sentido, destaca-se as características hidrológicas da estação Fazendinha (65010000), em cuja bacia hidrográfica foram apontados efeitos de armazenamento (SCHECHI et al., 2013), ocasionando uma resposta hidrológica à chuva mais lenta, de modo que os picos das vazões tendem a ser menos acentuados. Por outro lado, a estação Porto Vitória (65365000) está localizada em uma região que responde hidrologicamente como uma bacia pequena, de maneira que os hidrogramas tendem a ser mais acentuados, fundamentando os erros menores entre as vazões simuladas e observadas quando comparada com a primeira estação. Adicionalmente, cabe também salientar a diferença de áreas de drenagem entre os dois locais de estudo, podendo ser um indicativo de que as premissas do HU não sejam satisfatoriamente aplicáveis a áreas da ordem de 100 km², como no caso da estação Fazendinha (65010000).

As diferenças entre as vazões simuladas e observadas também são ilustradas da FIGURA 25 à FIGURA 28, nas quais é possível perceber as magnitudes dos valores superestimados ou subestimados das vazões de pico, por tempo de recorrência da chuva de projeto e por método de HUS.

FIGURA 25 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) na abordagem conservadora

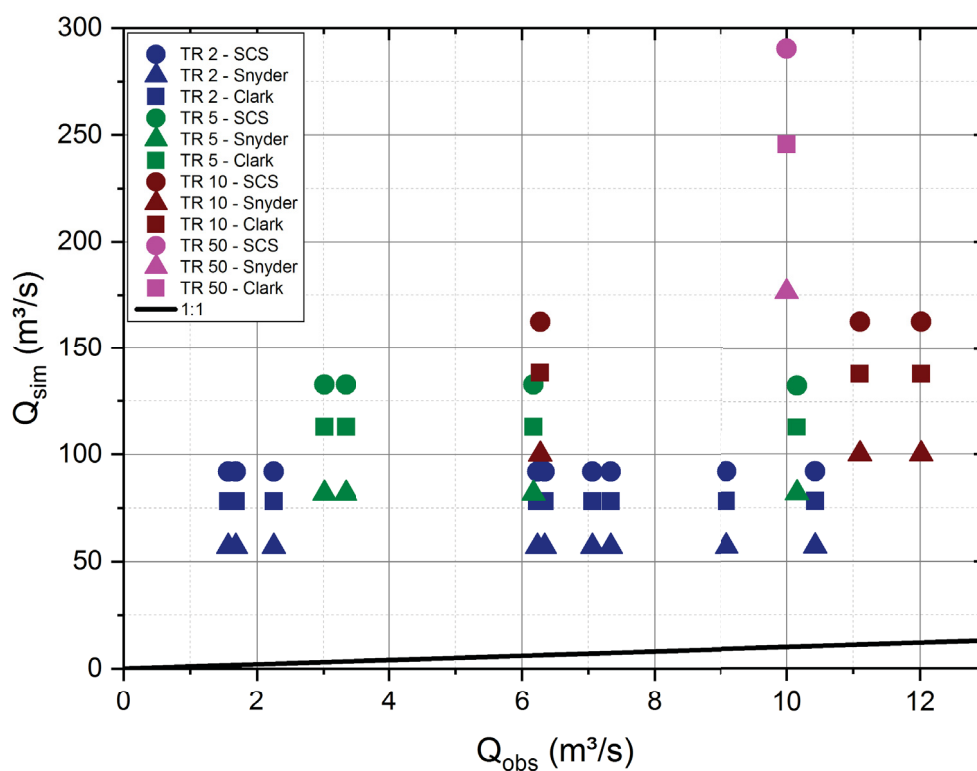


FIGURA 26 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) na abordagem arrojada

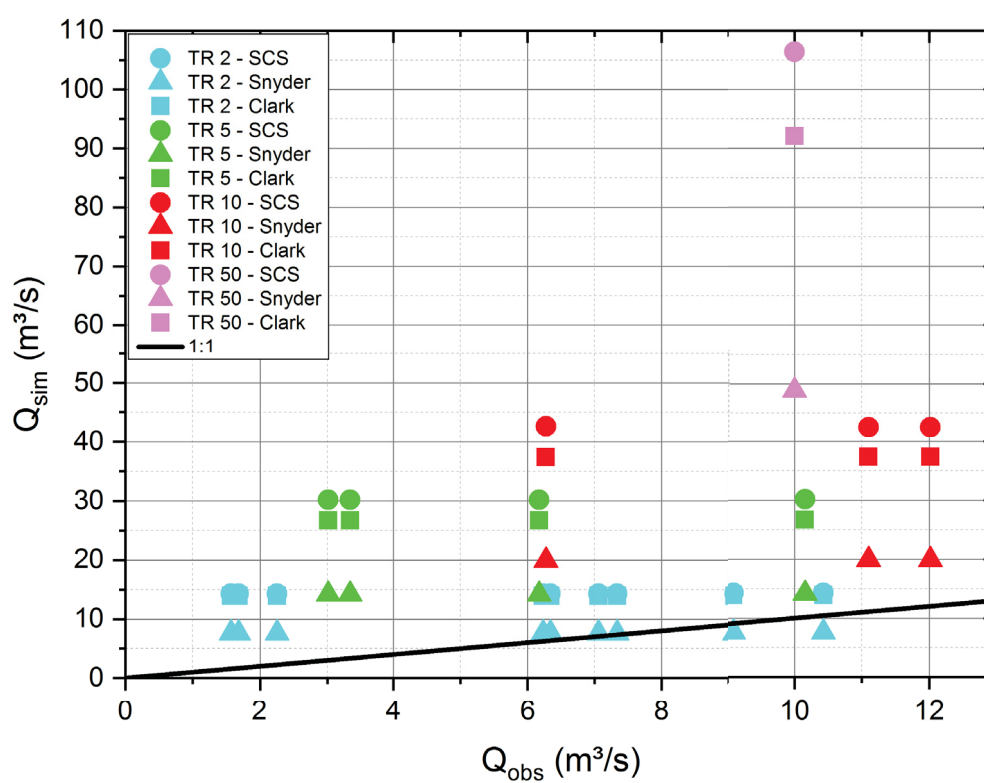


FIGURA 27 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) na abordagem conservadora

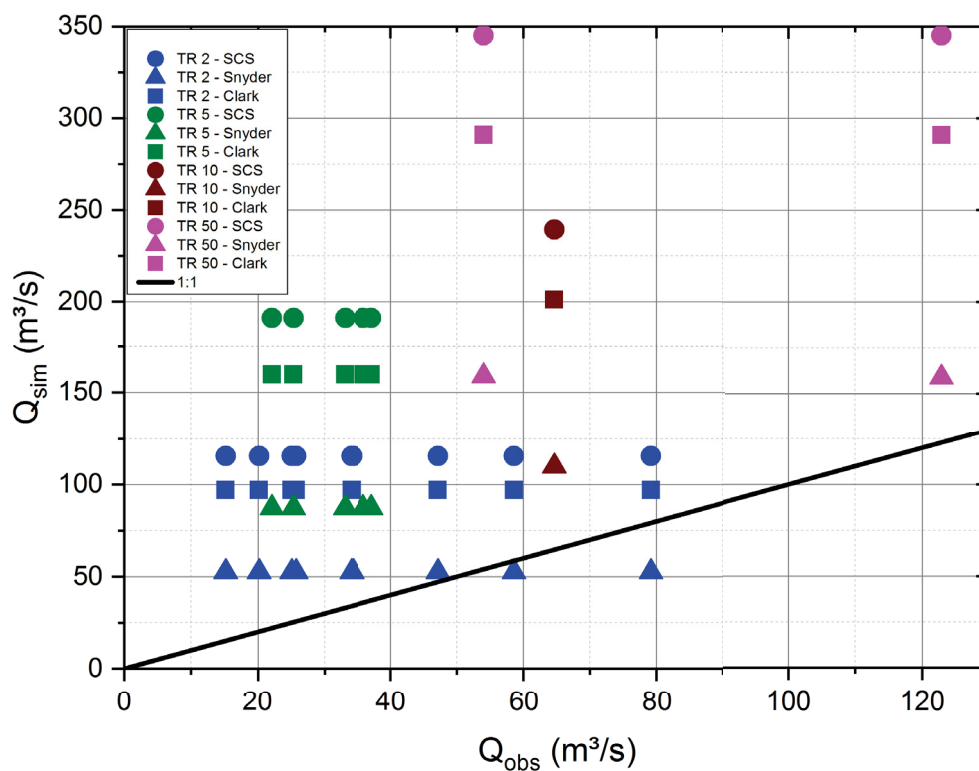
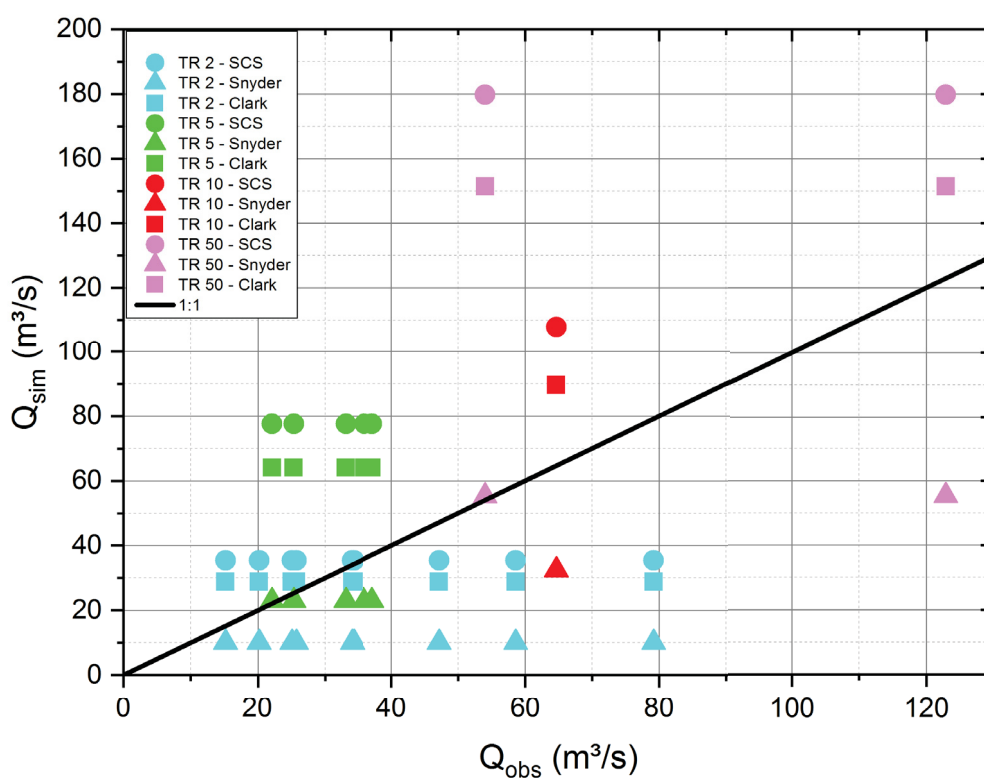


FIGURA 28 – Vazão simulada vs. vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) na abordagem arrojada



Das figuras mostradas fica evidente que, na prática, a premissa de uma chuva de projeto com determinado tempo de recorrência resultar em uma vazão de mesma recorrência não ocorre, visto que as maiores vazões observadas estão associadas a diferentes tempos de recorrência de chuva. Isso decorre da não linearidade da relação chuva-vazão, uma vez que as vazões nas bacias hidrográficas são oriundas de processos muito mais complexos e dependentes não apenas dos fatores climáticos, mas da combinação das diversas características da bacia não consideradas nos modelos de HUS mais simples, tais como estrutura geomorfológica e sistema de drenagem.

Para a análise da variabilidade dos resultados obtidos entre as simulações, a FIGURA 29 a FIGURA 32 ilustram, nos gráficos boxplot, a relação entre as vazões de pico simuladas e observadas em relação ao tempo de recorrência da chuva de projeto. É possível observar a magnitude dos erros entre as abordagens conservadora e arrojada para cada tempo de recorrência.

FIGURA 29 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do CN

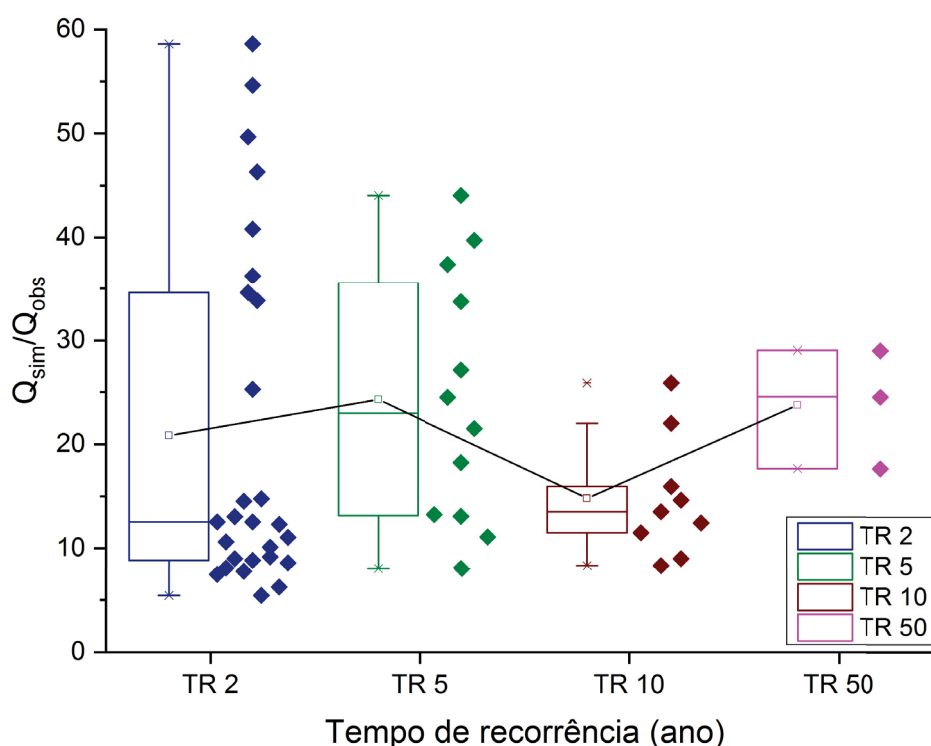


FIGURA 30 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do CN

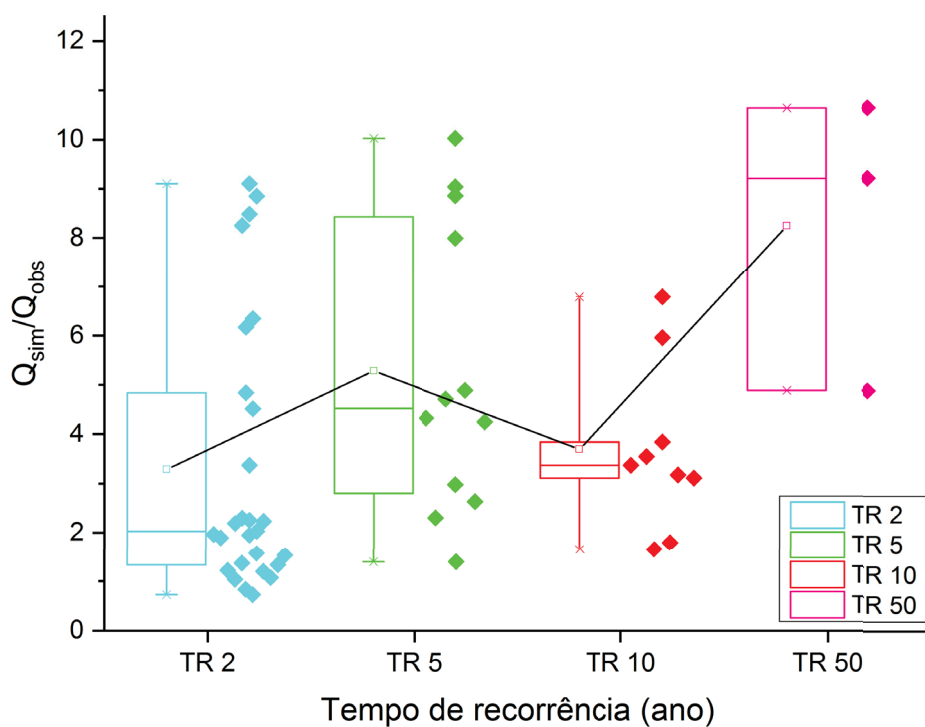


FIGURA 31 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do CN

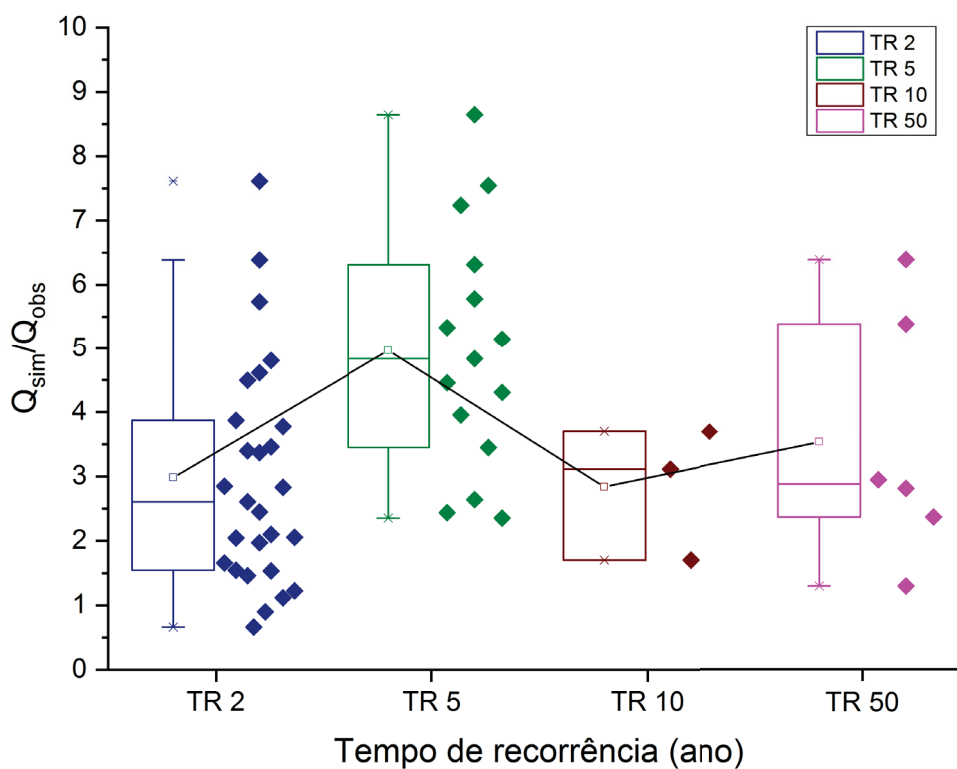
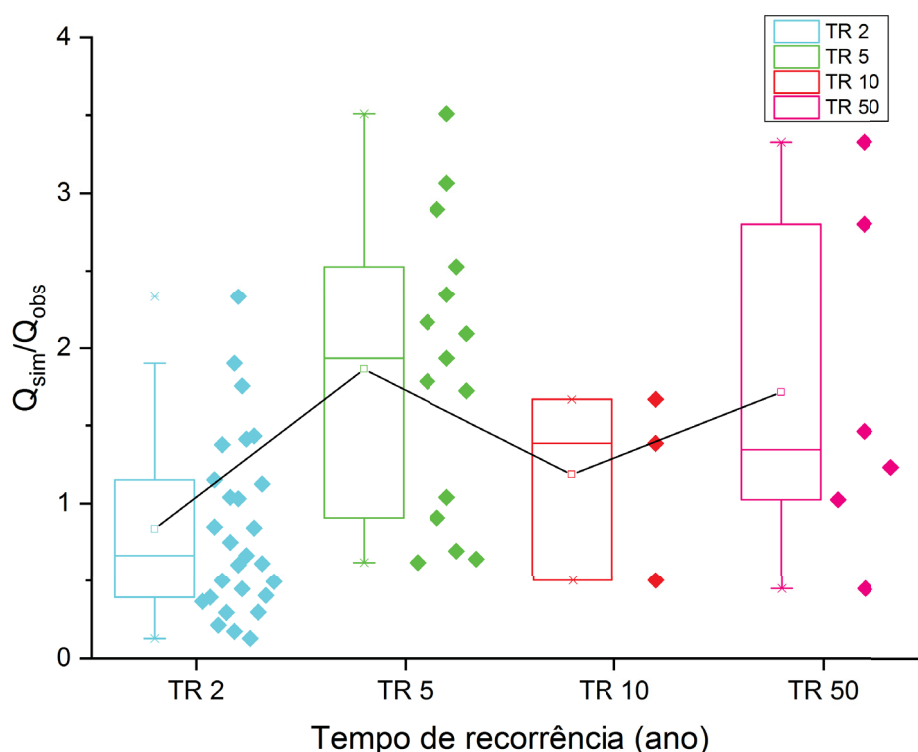


FIGURA 32 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do CN



No caso da estação Fazendinha (65010000), pode-se notar maiores erros e incertezas entre as vazões simuladas e observadas para os tempos de recorrência mais baixos, de 2 e 5 anos, em especial no terceiro quartil. As estimativas da vazão de pico apresentaram menor variabilidade para os eventos com recorrência de 10 anos.

Para a estação Porto Vitória (65365000) destaca-se a maior variabilidade entre os resultados para o tempo de recorrência de 5 anos, para ambas as abordagens. Ressalta-se, ainda, a grande variabilidade dos resultados para a recorrência de 50 anos, na abordagem arrojada.

Não foi possível inferir uma tendência de diminuição ou aumento dos erros médios quando do aumento do tempo de recorrência da chuva de projeto.

5.3 INCERTEZA COM A CHUVA EFETIVA CALCULADA PELO COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DIRETO

Apresenta-se a FIGURA 33 e a FIGURA 34 com a magnitude dos erros na vazão simulada em relação à relação entre a chuva efetiva simulada (Pe_{sim}) pelo HEC-HMS utilizando o método do CN para a abordagem arrojada e a chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto (Pe_{calc}) para cada evento.

FIGURA 33 – Relação entre a chuva efetiva calculada pelos métodos do CN e coeficiente de escoamento superficial e as vazões simuladas para a estação Fazendinha (65010000)

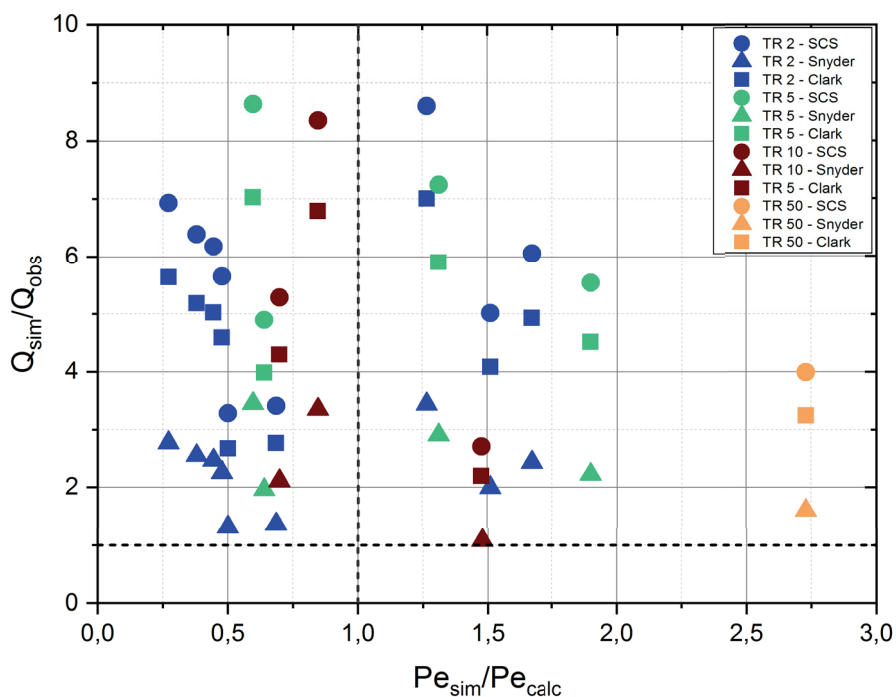
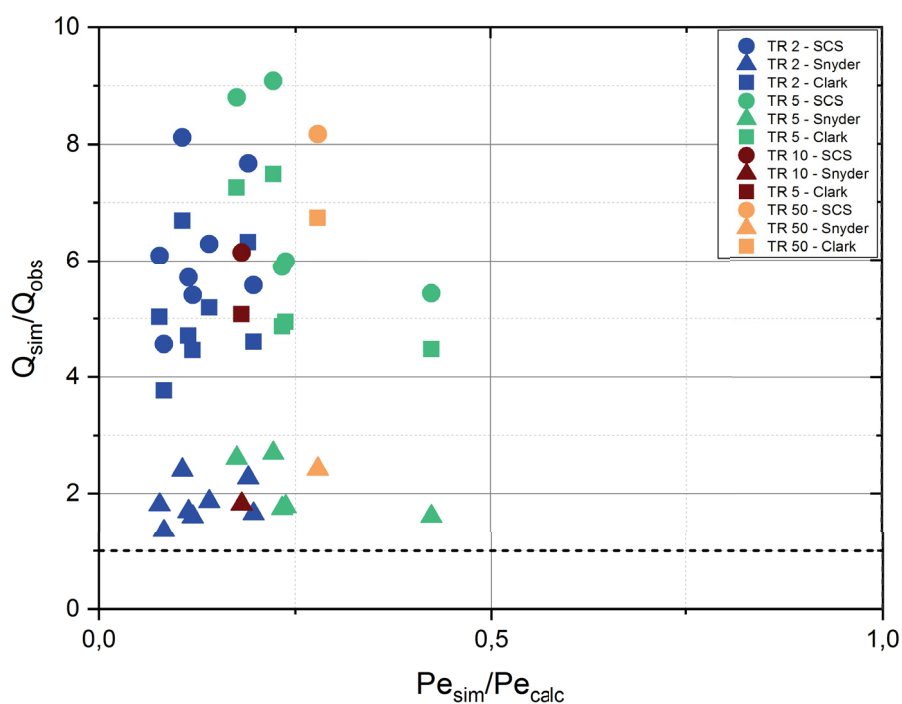


FIGURA 34 – Relação entre a chuva efetiva calculada pelos métodos do CN e coeficiente de escoamento superficial e as vazões simuladas para a estação Porto Vitória (65365000)



Destaca-se que para todos os eventos da estação Porto Vitória (65365000) e para a maioria dos eventos da estação Fazendinha (65010000) na abordagem arrojada (maior abstração inicial) a chuva efetiva calculada pelo método do coeficiente de escoamento direto resultou superior à chuva estimada pelo método do CN. Isso pode ser um indicativo de que o coeficiente das abstrações iniciais do método do CN, igual a 0,2, não é adequado para as áreas de estudo, devendo assumir valor inferior a esse, em consonância com as constatações realizadas por Valle Junior et al. (2019).

No entanto, mesmo nesses casos em que a chuva efetiva foi subestimada pelo método do CN ($Pe_{sim}/Pe_{calc} < 1$), os métodos de HUS superestimaram a vazão de pico. Portanto, o método de chuva efetiva do CN, que é largamente utilizado conjuntamente com os métodos de HUS, pode ser um potencializador dos erros, na medida em que eleva a relação Q_{sim}/Q_{obs} a valores muito maiores que 10, que foi aproximadamente o valor máximo obtido quando se utilizou a chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto.

A variabilidade dos resultados das simulações a partir da chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto é apresentada da FIGURA 35 a FIGURA 38.

FIGURA 35 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do α

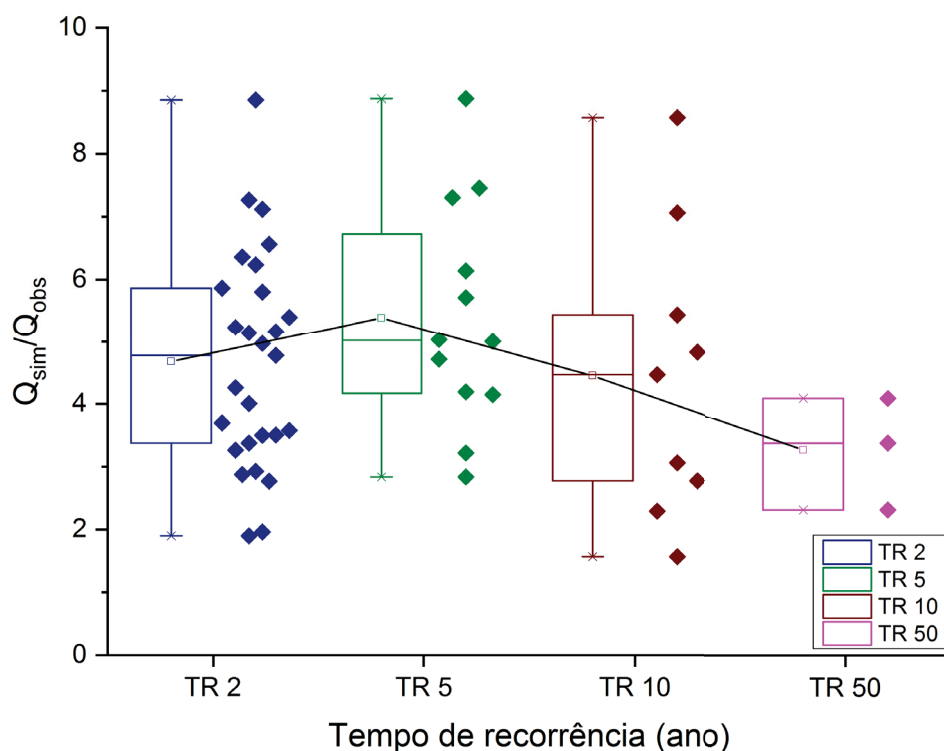


FIGURA 36 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Fazendinha (65010000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do α

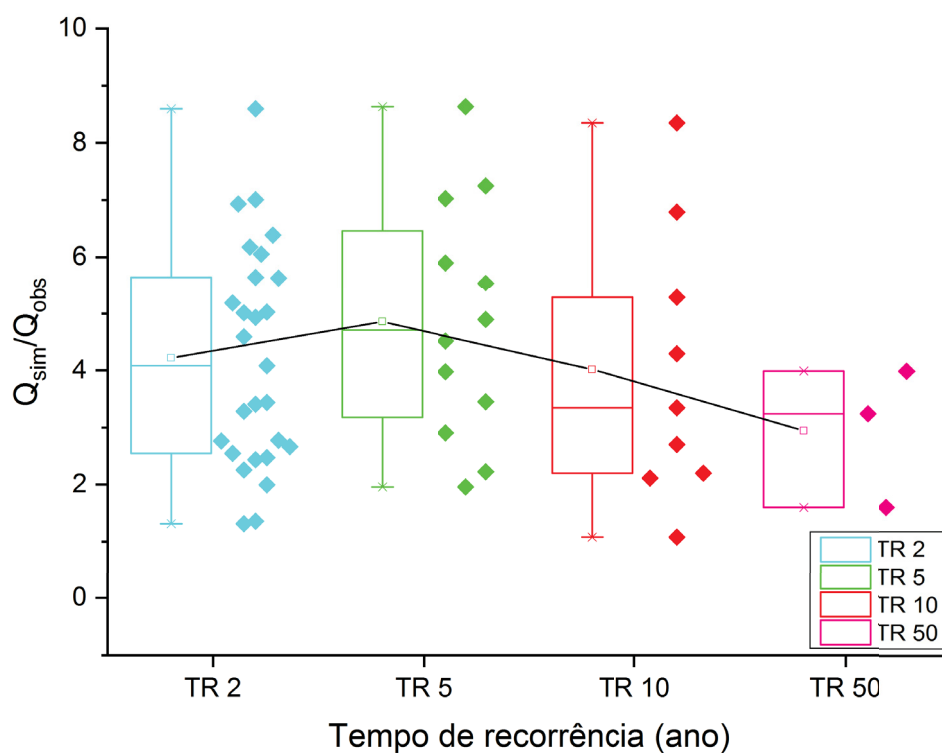


FIGURA 37 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem conservadora, com chuva efetiva estimada pelo método do α

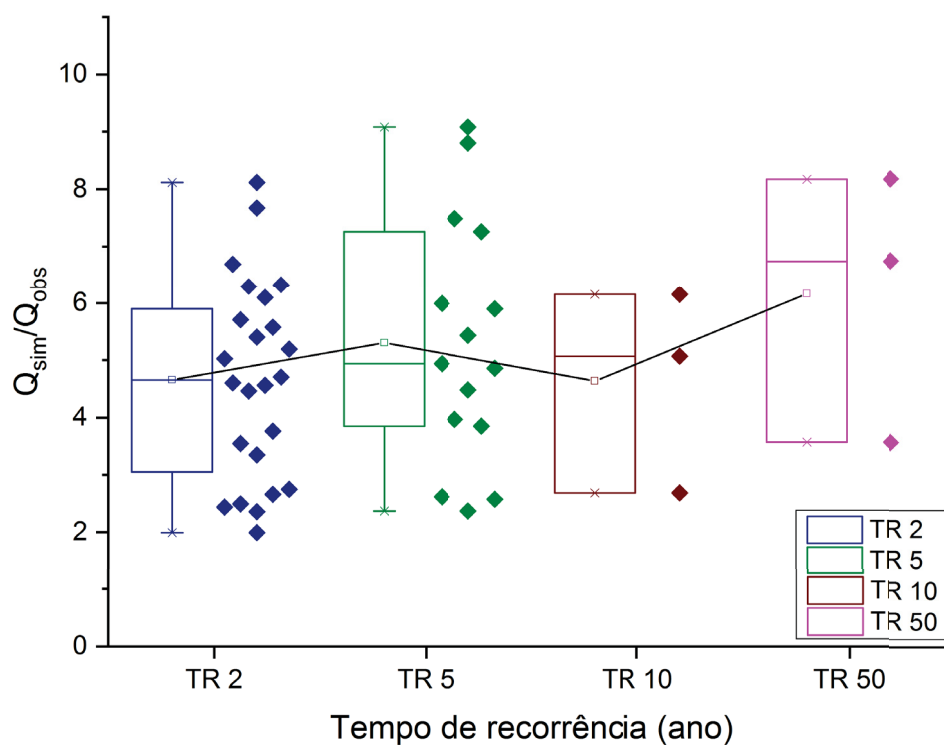
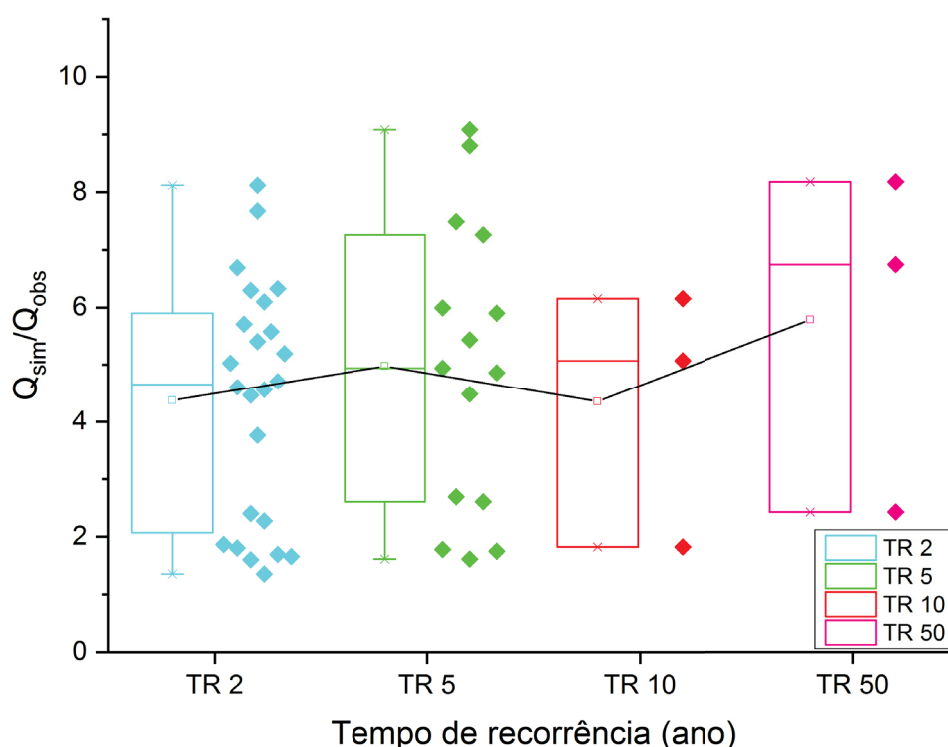


FIGURA 38 – Gráfico boxplot da relação entre vazão simulada e vazão observada para a estação Porto Vitória (65365000) em relação ao TR da chuva de projeto, para a abordagem arrojada, com chuva efetiva estimada pelo método do α



Para a estação Fazendinha (65010000) é possível constatar que as incertezas e erros máximos alcançados pela relação Q_{sim}/Q_{obs} diminuíram quando comparados com aqueles produzidos a partir da estimativa da chuva efetiva pelo método do CN. Em termos médios, a relação Q_{sim}/Q_{obs} diminuiu de 20 vezes para 5 vezes, na abordagem conservadora, quando da consideração da chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto. Adicionalmente, observa-se uma tendência de diminuição do erro médio com o aumento do tempo de recorrência.

No entanto, essas mesmas constatações não se aplicaram ao caso da estação Porto Vitória (65365000), na qual a abordagem arrojada do método de chuva efetiva do CN resultou em menor incerteza e erros médios. Não houve tendência de diminuição do erro médio com o aumento do tempo de recorrência, mantendo a relação média Q_{sim}/Q_{obs} em torno de 5.

6 CONCLUSÕES

“Modern engineer, now and in the future, has to supplement individual reasoning and creative work with a scientific approach to engineering tasks.”
Votrubá et al. (1988)

As incertezas dos resultados obtidos pelos HUS no presente estudo destacam como essa ferramenta de modelagem hidrológica impacta na tomada de decisões, em especial pela sua utilização com finalidade prática em estudos e projetos.

Inicialmente, a incerteza dos dados fluviométricos e pluviométricos utilizados foi reduzida por meio de análise de consistência, a partir da qual foram desconsiderados do estudo períodos com dados espúrios. Ainda, houve uma diminuição nos erros relativos entre as medições e as vazões calculadas pelas curvas, de 17% para 9% no caso da estação Fazendinha (65010000) e de 14% para 11% na estação Porto Vitória (65365000).

No que tange aos parâmetros de entrada nos modelos de HUS, o *CN* foi o parâmetro de maior sensibilidade. Quanto aos demais parâmetros de entrada, variações nesses produziram diferenças de até aproximadamente 3% nos HUS do SCS e Clark e de até cerca de 45% no HUS de Snyder, mostrando a sua relevância apenas para esse último método.

Com relação ao desempenho dos métodos de HUS, verificou-se que, em consonância com as constatações de outros estudos, os três métodos analisados neste estudo superestimaram, via de regra, as vazões de pico para ambas as bacias hidrográficas em estudo.

O HUS do SCS produziu as maiores vazões de pico e, conseqüentemente, os maiores erros, resultando em até 50 vezes superior às vazões observadas no caso da estação Fazendinha (65010000) e aproximadamente 10 vezes superior às vazões observadas no caso da estação Porto Vitória (65365000), considerando a abordagem conservadora na estimativa da chuva efetiva pelo método do CN. O HUS de Snyder apresentou, para a estação Fazendinha (65010000) na abordagem arrojada, os melhores resultados para todos os tempos de recorrência, porém ainda com vazões de pico simuladas até 5 vezes superiores às observadas. No caso da estação Porto Vitória (65365000), a abordagem arrojada do HUS de Snyder apresentou os melhores resultados para os tempos de recorrência de 5 e 50 anos, e a mesma abordagem para o HUS de Clark apresentou os melhores resultados para os tempos de recorrência de 2 e 10 anos, com vazões de pico simuladas não superiores em 3 vezes às observadas.

Nos casos em que as abordagens arrojada e conservadora produziram, respectivamente, resultados subestimados e superestimados, observou-se que, em geral, as magnitudes dos erros foram bastante discrepantes. Erros de 30% inferiores na abordagem arrojada estavam relacionados a erros de até 500% superiores na abordagem conservadora.

Os resultados utilizando a chuva efetiva estimada pelo método do coeficiente de escoamento direto mostrou que os HUS são fundamentalmente modelos conservadores, em especial os do SCS e de Clark, pois sempre superestimaram as vazões de pico. Portanto, uma abordagem arrojada na estimativa dos parâmetros de entrada já é suficientemente conservadora, conduzindo a resultados com menores erros nas vazões de pico simuladas.

Dada a variabilidade dos resultados entre as duas áreas de estudo e entre as abordagens adotadas não foi identificada tendência de melhoramento dos métodos de HUS para tempos de recorrência da chuva de projeto mais elevados. Também não foi possível identificar um valor padrão de erro que pudesse ser utilizado como um coeficiente de correção entre as vazões de pico simuladas pelos HUS e as vazões reais.

De modo geral, a magnitude dos erros foi menor para a estação Porto Vitória (65365000) em comparação com aqueles obtidos para a estação Fazendinha (65010000). Esse fato pode estar relacionado à diferença entre as áreas de drenagem e características hidrológicas dos locais de estudo. A estação Porto Vitória (65365000) possui área de drenagem aproximadamente 40% menor que a estação Fazendinha (65010000), podendo adequar-se melhor à aplicação dos fundamentos dos modelos de HU, e as suas características hidrológicas de resposta típicas de bacias pequenas favoreceram a aplicação dos modelos de HUS.

Finalmente, constatou-se que os erros dos hidrogramas simulados em relação aos observados foram muito maiores do que as incertezas considerando as diversas combinações de parâmetros de entrada. Desse modo, o desempenho dos métodos deve ser avaliado à frente das incertezas.

Adicionalmente, a aplicação dos modelos mais simplificados de HUS em estudos hidrológicos subsidiários de projetos de engenharia em bacias sem dados de monitoramento deve, portanto, ser realizada com cautela e acompanhada de uma análise crítica dos resultados quanto à sua adequação, levando em consideração valores de referência existentes para a área de estudo, tais como vazões máximas específicas, obtidos de outros estudos ou a partir de dados disponíveis em bacias hidrográficas próximas e com características hidroclimatológicas semelhantes.

Para estudos futuros, pode-se verificar os efeitos da discretização espacial das bacias em unidades menores e mais homogêneas, com base nas características de tipo e uso e ocupação do solo, acoplada a modelos de propagação do escoamento até a exutória de interesse. Adicionalmente, embora os modelos de HUS do SCS e de Clark não tenham se mostrado sensíveis a variações no tempo de concentração, pode-se realizar a estimativa desse parâmetro a partir dos eventos observados e incluí-lo junto com a estimativa da chuva efetiva para eliminar o efeito desse na análise de incerteza dos modelos de HUS. Por fim, pode-se ainda calibrar os parâmetros dos métodos de HUS ou defini-los a partir dos HU das bacias em estudo, realizando-se posteriormente a análise comparativa da incerteza dos parâmetros empíricos/estimados e calibrados/determinados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados fluviométricos**. Brasília: ANA, SGH, 2011.
- _____. **Rede de monitoramento hidrometeorológico**. [S.l.: s.n.], 2013.
- _____. **Sistemas de informação na gestão de águas: Conhecer para decidir**. v. 8. Brasília, 2016.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, abr. 1999.
- BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. Modelo de previsão de vazão baseado no hidrograma unitário. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 165–174, out./dez. 2011.
- BASSO, R. E. et al. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635–641, out/dez 2016.
- BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. da. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 4, p. 5–16, out./dez. 2000.
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. Synthetic unit hydrograph methods: A critical review. **The Open Hydrology Journal**, v. 5, p. 1–8, 2011.
- BRAS, R. L. **Hydrology: An introduction to hydrologic science**. Boston: Addison-Wesley, 1990.
- BRUNNER, M. I. et al. Uncertainty assessment of synthetic design hydrographs for gauged and ungauged catchments. **Water Resources Research**, 2018.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- CUNHA, S. F. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 837–848, out./dez. 2015.
- DENVER. **Urban drainage and flood control district**. v. 1-2. Denver, CO: [s.n.], 2001.

- EMAM, A. R. et al. Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms. **Frontiers in Earth Science**, 2018.
- ESLMIAN, S. **Handbook of engineering hydrology: fundamentals and applications**. Bosa Roca: United States: Taylor & Fancis Inc, 2014.
- FILL, H. D.; STEINER, A. A. Estimativa do hidrograma instantâneo e da vazão máxima de enchentes a partir de vazões médias diárias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 17–27, jul. 2003.
- HOFFMEISTER, G.; WEISMAN, R. N. Accuracy of synthetic hydrographs derived from representative basins. **Hydrological Sciences Bulletin**, 22:2, p. 297–312, 1977.
- HRACHOWITZ, M. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB): a review. **Hydrological Sciences Journal**, 2013.
- INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ (ITCG). **Mapa de solos**. [S.l.: s.n.], 2008.
- _____. **Mapa de uso do solo - 2001/2002**. [S.l.: s.n.], 2001.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. **Curva-chave: Análise e traçado**. Brasília: DNAEE, 1989.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement**. [S.l.: s.n.], 2008.
- LIMA, G. de et al. Análise de incertezas de observações hidrológicas e sua influência na modelagem de pequenas bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 107–116, jan. 2007.
- LOPES, W. T. A. et al. Sistema para análise de dados hidrológicos - SIADH. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves: ABRH, 2013.
- MAMÉDIO, F. M. P.; REIS CASTRO, N. M. dos; CORSEIUL, C. W. Tempo de concentração para bacias rurais monitoradas na região do planalto basáltico no Sul do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina - REGA**, v. 15, 2018.
- MINE, M. R. M.; TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da produção de energia e controle de inundação: Foz de Areia no rio Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 85–107, jul. 2002.
- PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- RAUDKIVI, A. J. **Hydrology: An advanced introduction to hydrological processes and modelling**. Oxford: Pergamon Press, 1979.
- SANTOS, I. dos et al. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

- SCHECHI, R. G. et al. Avaliação da capacidade potencial de armazenamento de água na bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR. **Floresta**, v. 43, n. 2, p. 205–214, abr.-jun. 2013.
- SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, jan. 2005.
- _____. Fator de pico para hidrogramas unitários sintéticos triangulares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 46–52, jan. 2016.
- SINGH, P. K.; MISHRA, S. K.; JAIN, M. K. A review of the synthetic unit hydrograph: From the empirical UH to advanced geomorphological methods. **Hydrological Sciences Journal**, 59 (2), p. 239–261, 2014.
- SOUZA, R. M. de. **Heterogeneidade espacial e efeito de escala no escoamento de base em bacias embutidas no Alto Iguaçu/PR**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- STEINMETZ, A. A. et al. Spatial discretization influence on flood modeling using unit hydrograph theory. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019.
- THORVAT, A. R.; PATEL, J. N. Empirical approach to develop synthetic unit hydrographs for ungauged Dhamani basin, Maharashtra (India). **International Journal of Hydrology Science and Technology**, v. 6, n. 3, p. 266–284, 2016.
- TORRICO, J. J. T. **Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 1974.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2010.
- _____. **Modelos hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.
- _____. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 195–199, abr./jun. 2003.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1995.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Technical Release 55: Urban hydrology for small watersheds**. Washington, 1986.
- VALLE JUNIOR, L. C. G. do; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S. de. Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019.
- VISSMAN JUNIOR, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 4 ed. London: Pearson, 1997.
- WAGENER, T.; WHEATHER, H. S.; GUPTA, H. V. **Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments**. Edição: Tjan Kwang Wei. [S.I.]: Imperial College Press, 2004.

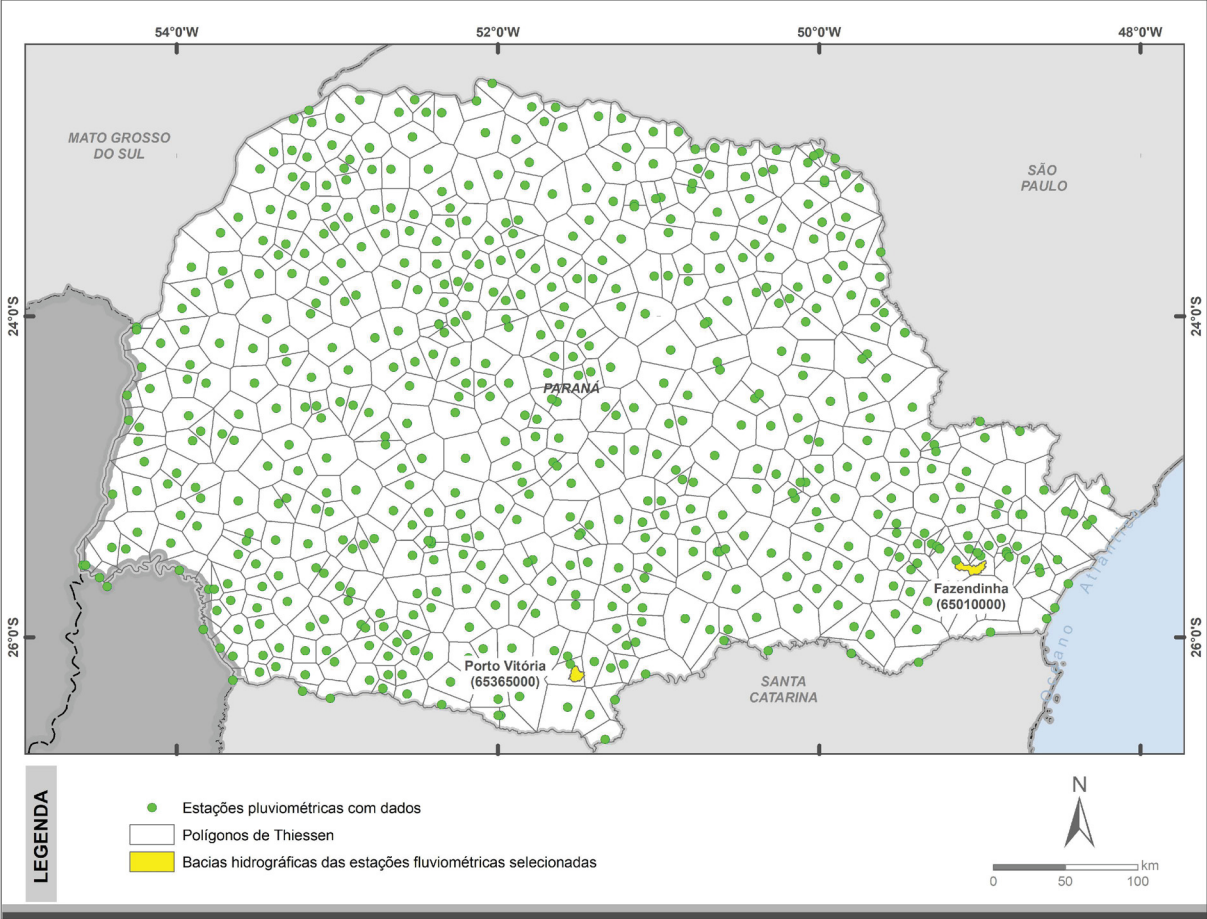
WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

ZAKIZADEH, F.; MALEKINEZHAD, H. Comparison of methods for estimation of flood hydrograph characteristics. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 40, n. 12, p. 828–837, 2015.

APÊNDICES

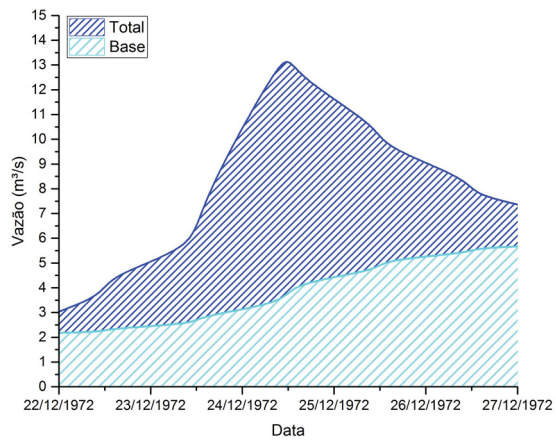
APÊNDICE A – POLÍGONOS DE THIESSEN

FIGURA A.1 – Polígonos de Thiessen com as estações pluviométricas com dados

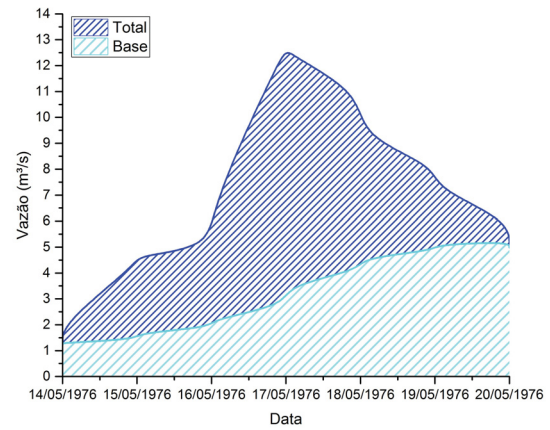


APÊNDICE B – EXEMPLOS DE FLUVIOGRAMAS DA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE

Fazendinha (65010000)

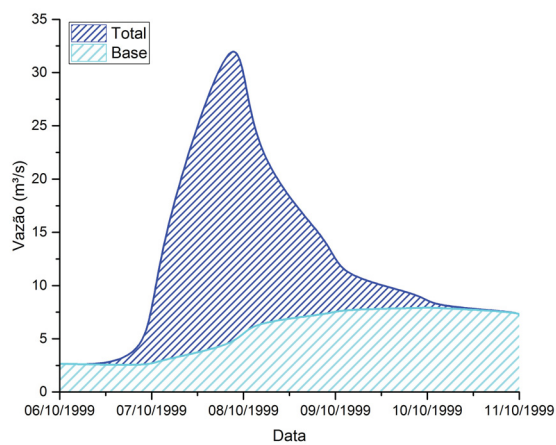


(a) Tempo de recorrência - 2 anos

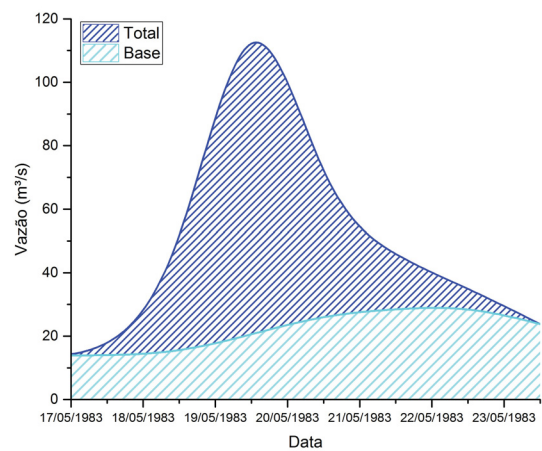


(b) Tempo de recorrência - 50 anos

Porto Vitória (65365000)



(a) Tempo de recorrência - 2 anos



(b) Tempo de recorrência - 50 anos

APÊNDICE C – CURVAS ALTURA-DURAÇÃO DAS CHUVAS DE PROJETO

FIGURA C.1 – Curvas altura duração das chuvas de projeto, por TR , para o local da estação fluviométrica Fazendinha (65010000)

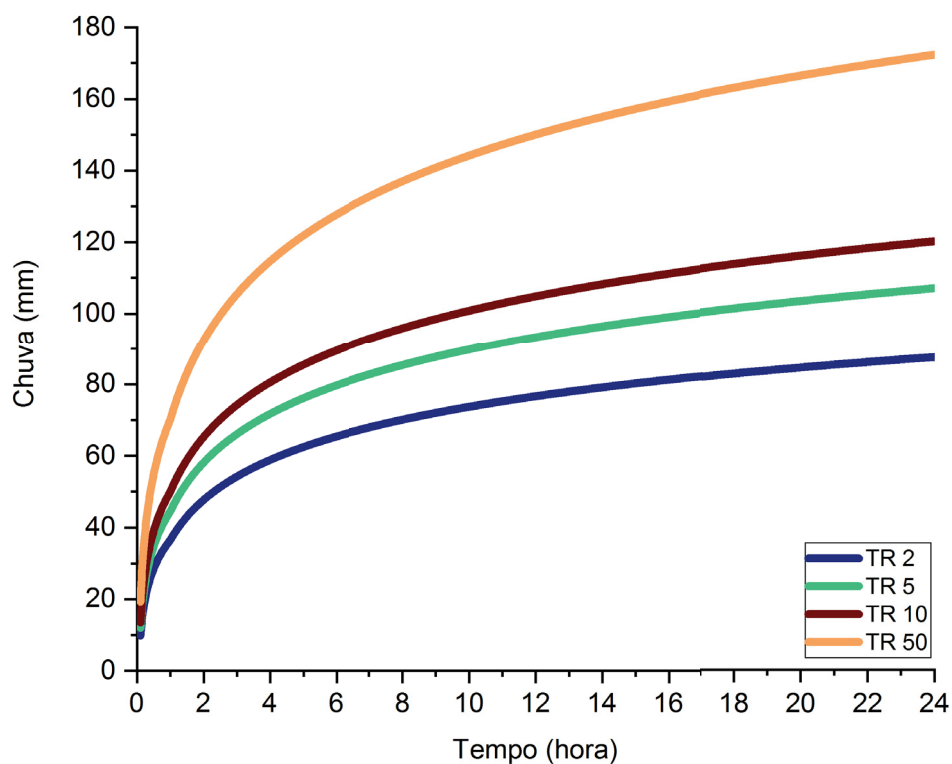
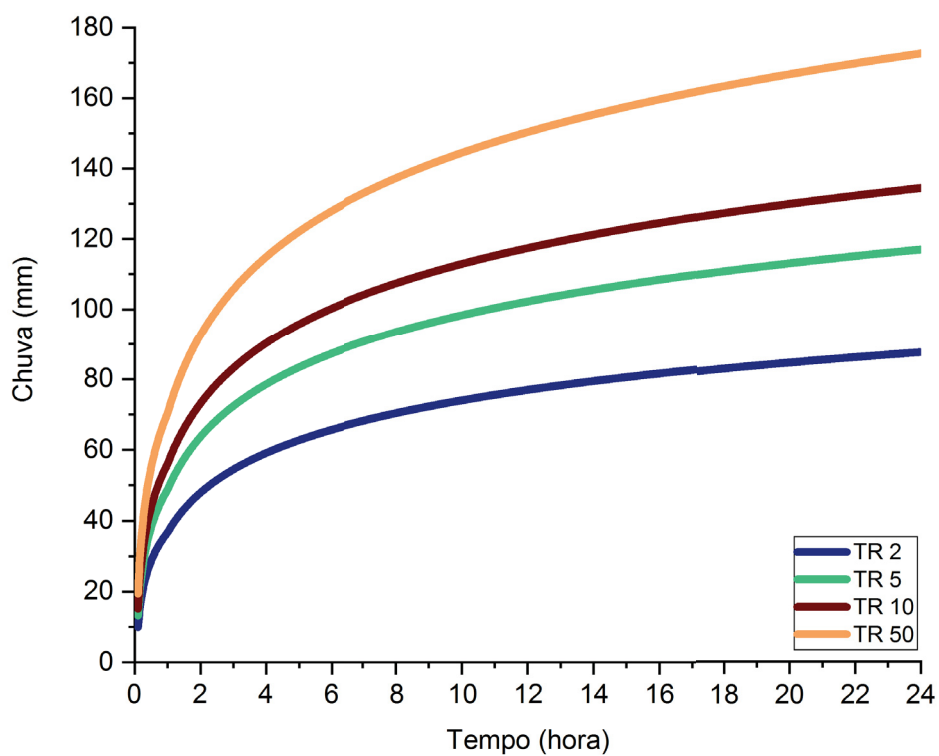
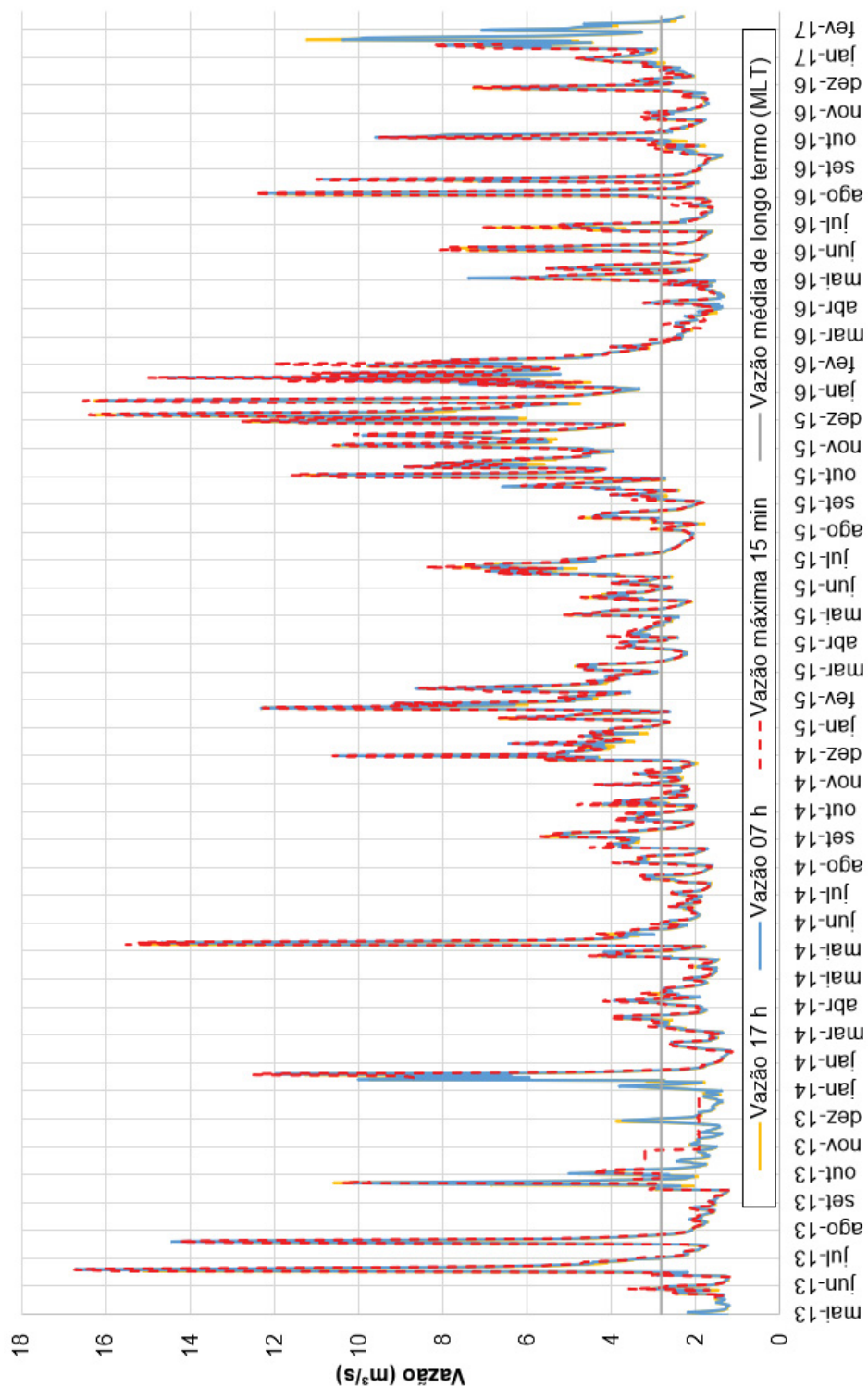


FIGURA C.2 – Curvas altura duração das chuvas de projeto, por TR , para o local da estação fluviométrica Porto Vitória (65365000)



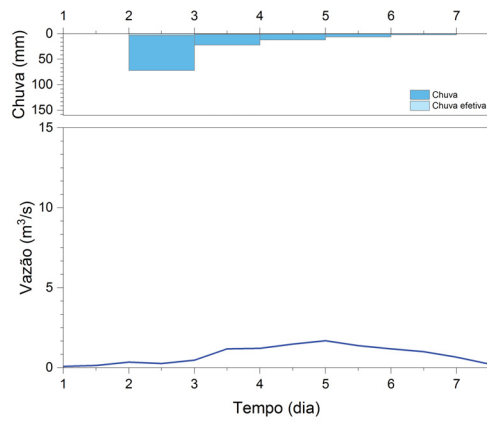
APÊNDICE D – FLUVIOGRAMAS MÉDIO DIÁRIO E MÁXIMO A CADA 15 MINUTOS

FIGURA E.1 – Fluviogramas médio diário e máximo a cada 15 minutos da estação fluviométrica Fazendinha (65010000)

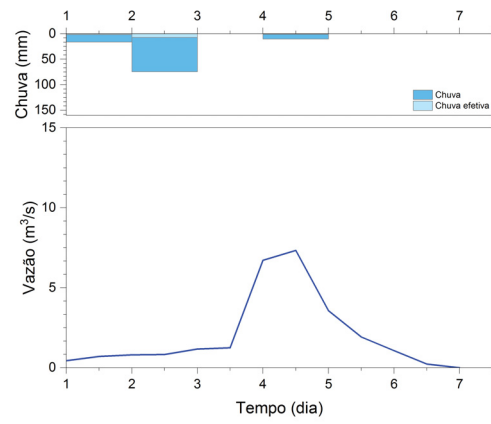


APÊNDICE E – EVENTOS CHUVA-VAZÃO SELECIONADOS

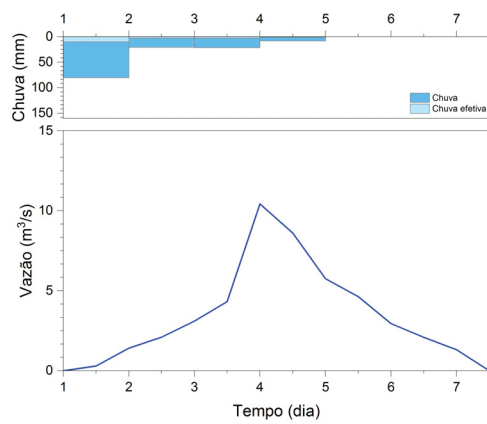
Eventos chuva-vazão selecionados - Fazendinha (65010000)



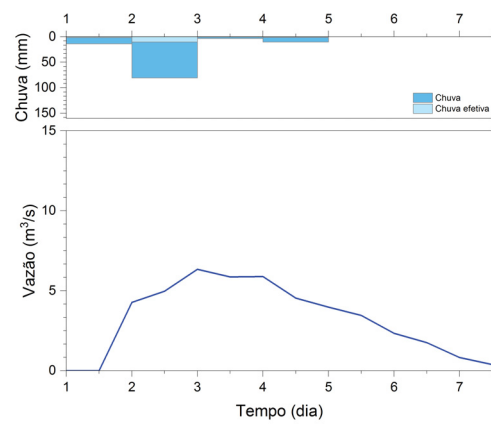
(a) Evento 1



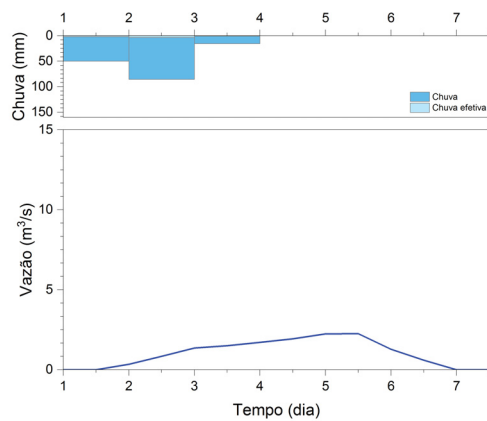
(b) Evento 2



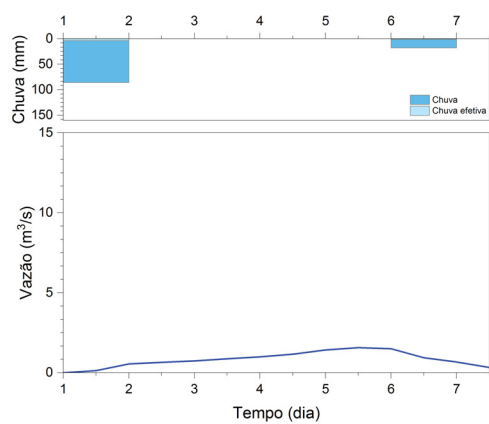
(a) Evento 3



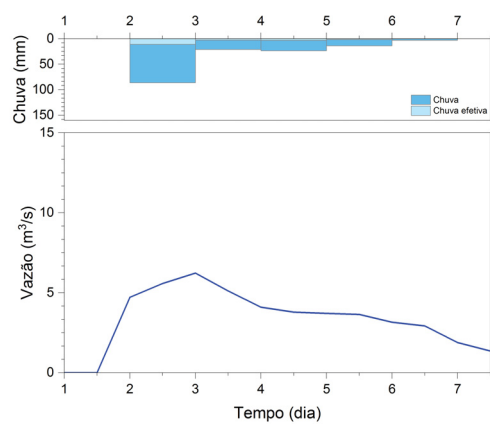
(b) Evento 4



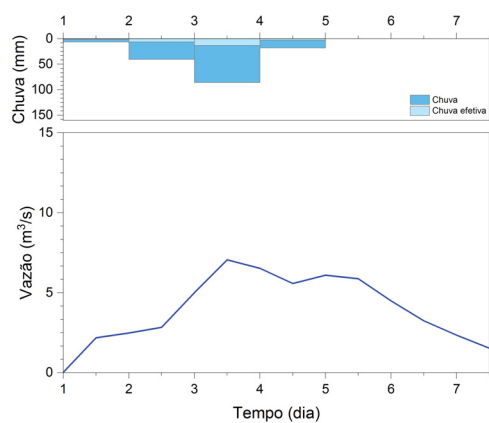
(a) Evento 5



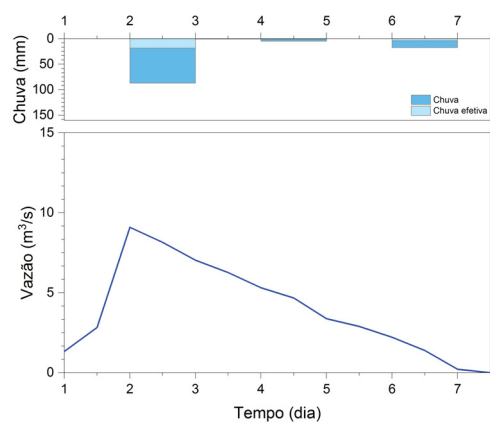
(a) Evento 6



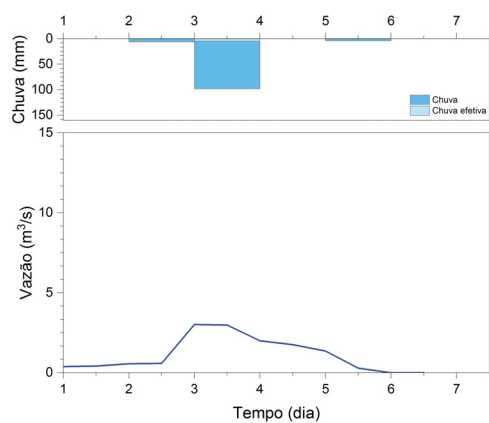
(b) Evento 7



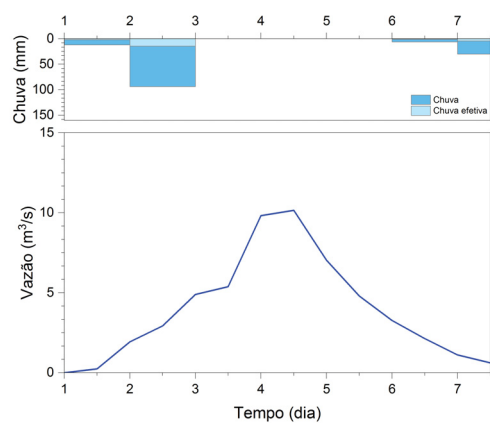
(a) Evento 8



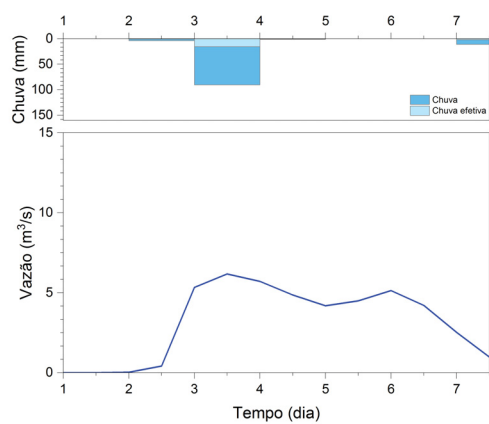
(b) Evento 9



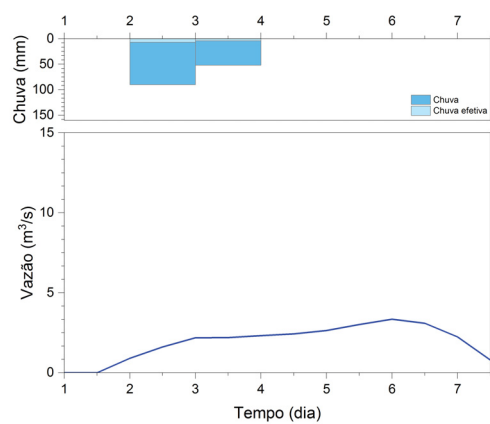
(a) Evento 10



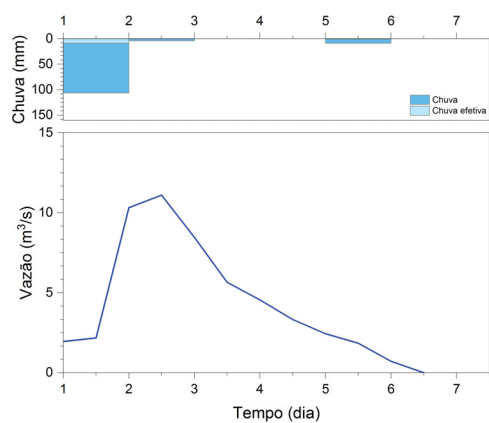
(b) Evento 11



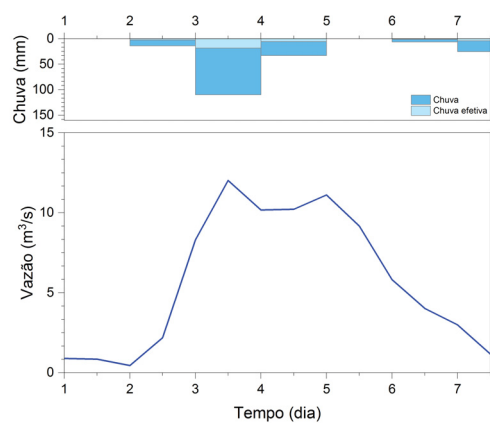
(a) Evento 12



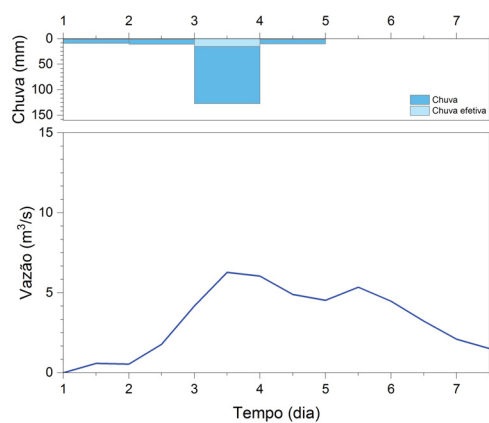
(b) Evento 13



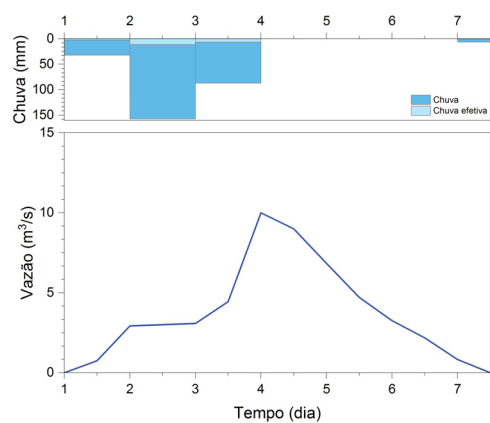
(a) Evento 14



(b) Evento 15

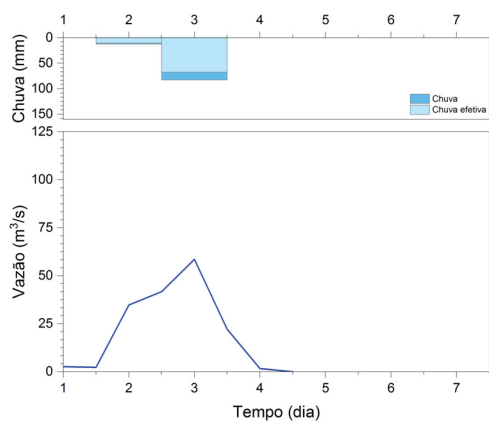


(a) Evento 16

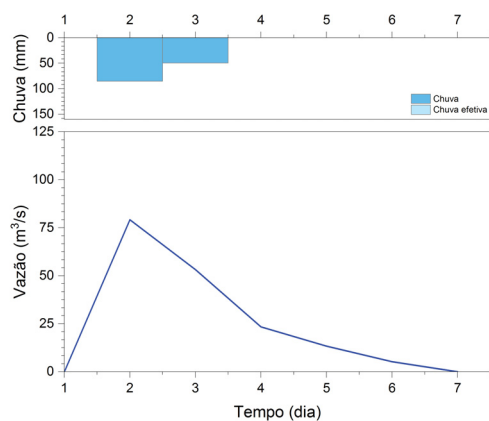


(b) Evento 17

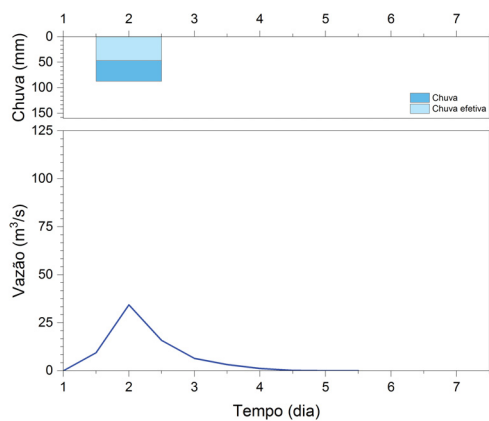
Eventos chuva-vazão selecionados - Porto Vitória (65365000)



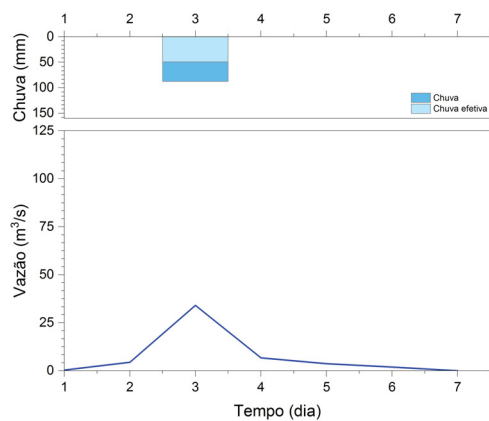
(a) Evento 1



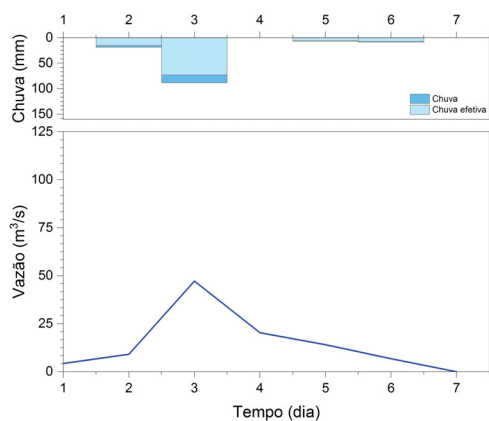
(b) Evento 2



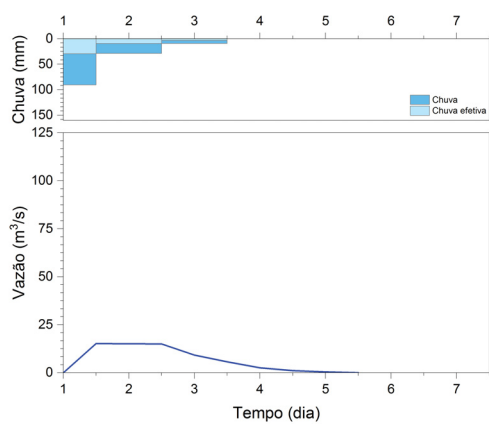
(a) Evento 3



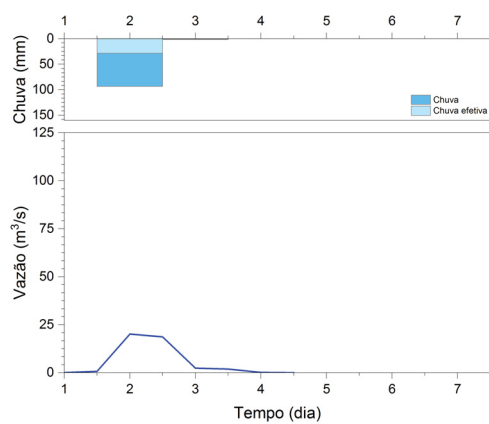
(b) Evento 4



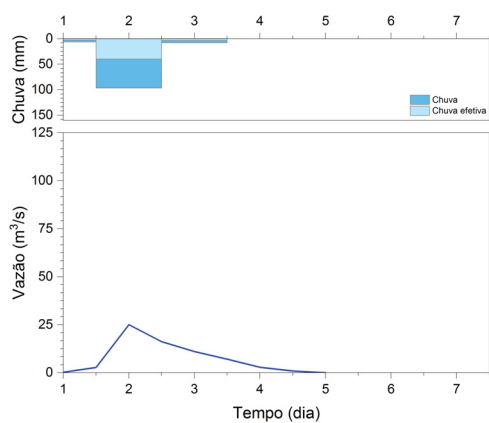
(a) Evento 5



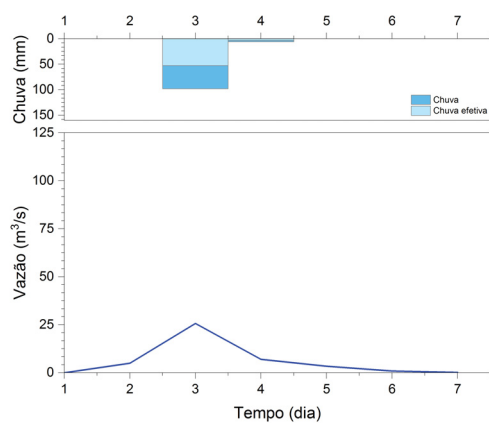
(a) Evento 6



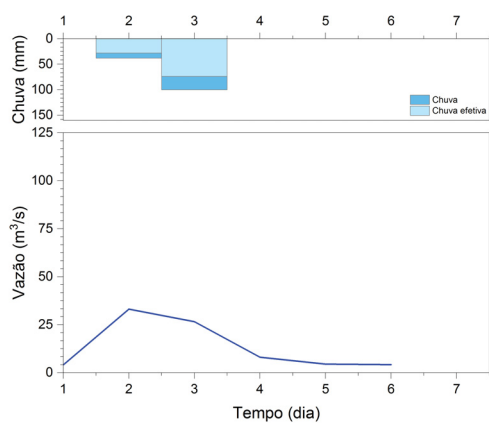
(b) Evento 7



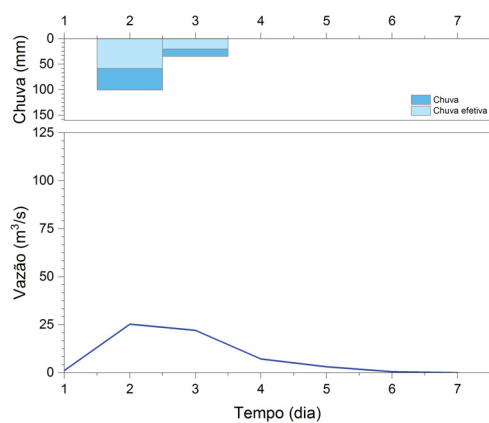
(a) Evento 8



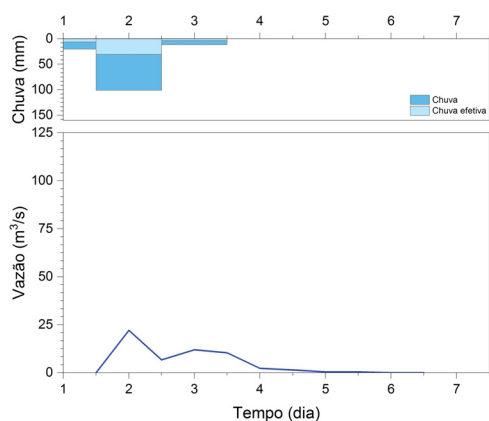
(b) Evento 9



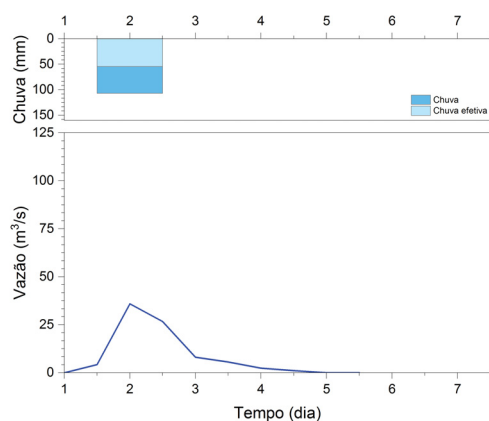
(a) Evento 10



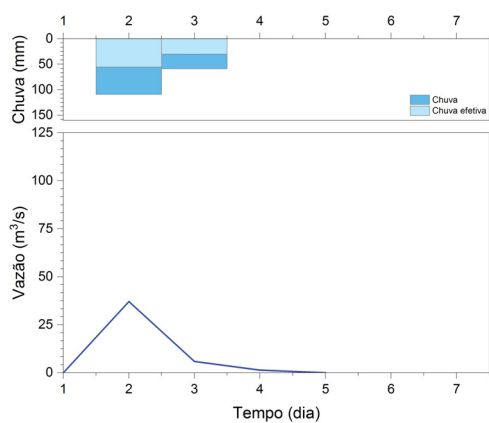
(b) Evento 11



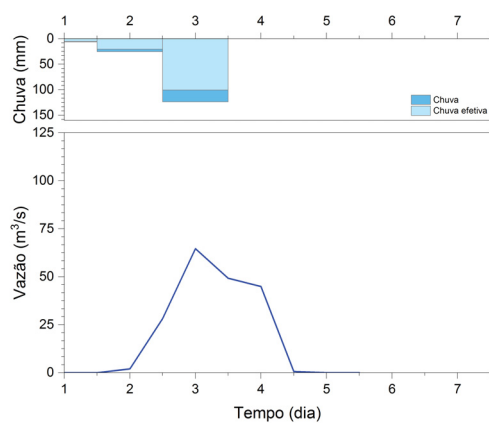
(a) Evento 12



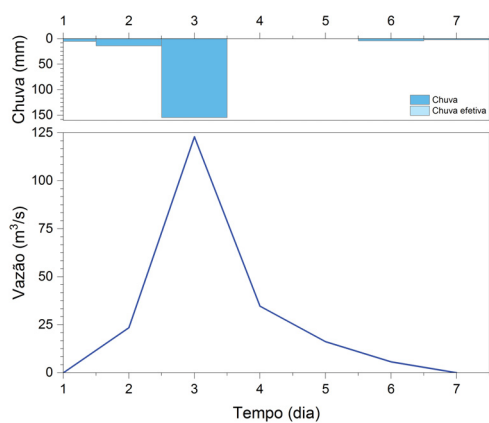
(b) Evento 13



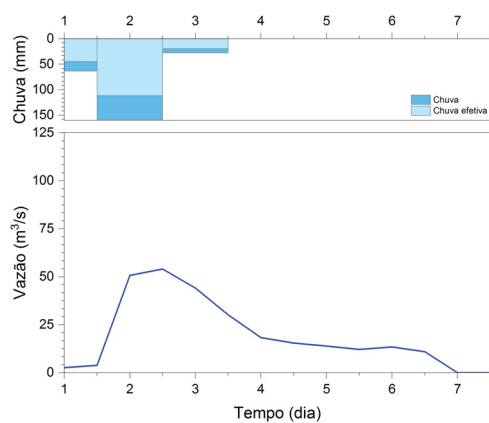
(a) Evento 14



(b) Evento 15



(a) Evento 16



(b) Evento 17

**APÊNDICE F – VAZÕES DE PICO OBSERVADAS, VAZÕES DE PICO
SIMULADAS, RELAÇÃO Q_{sim}/Q_{obs} POR ESTAÇÃO E MÉTODO DE HUS**

TABELA F.1 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS de Snyder

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	1,7	57,0	7,6	33,8	4,5
	7,3			7,8	1,0
	10,4			5,5	0,7
	6,3			9,0	1,2
	2,3			25,3	3,4
	1,6			36,3	4,8
	6,2			9,1	1,2
	7,1			8,1	1,1
	9,1			6,3	0,8
5	3,0	81,8	14,2	27,2	4,7
	10,2			8,1	1,4
	6,2			13,2	2,3
	3,3			24,5	4,3
10	11,1	100,0	19,9	9,0	1,8
	12,0			8,3	1,7
	6,3			15,9	3,2
50	10,0	176,6	48,9	17,7	4,9

TABELA F.2 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS do SCS

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	1,7	92	14,3	54,6	8,5
	7,3			12,5	1,9
	10,4			8,8	1,4
	6,3			14,5	2,3
	2,3			40,8	6,3
	1,6			58,6	9,1
	6,2			14,8	2,3
	7,1			13,0	2,0
	9,1			10,1	1,6
5	3,0	132,7	30,2	44	10,0
	10,2			13,1	3,0
	6,2			21,5	4,9
	3,3			39,7	9,0
10	11,1	162,5	42,6	14,6	3,8
	12,0			13,5	3,5
	6,3			25,9	6,8
50	10,0	290,3	106,4	29,0	10,6

TABELA F.3 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Fazendinha (65010000) para o HUS de Clark

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	1,7	78,0	13,9	46,3	8,3
	7,3			10,6	1,9
	10,4			7,5	1,3
	6,3			12,3	2,2
	2,3			34,6	6,2
	1,6			49,7	8,9
	6,2			12,5	2,2
	7,1			11,0	2,0
	9,1			8,6	1,5
5	3,0	112,7	26,7	37,4	8,9
	10,2			11,1	2,6
	6,2			18,2	4,3
	3,3			33,7	8,0
10	11,1	138,1	37,4	12,4	3,4
	12,0			11,5	3,1
	6,3			22,0	6,0
50	10,0	245,6	92,1	24,6	9,2

TABELA F.4 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS de Snyder

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	58,6	52,6	10,1	0,9	0,2
	79,2			0,7	0,1
	34,3			1,5	0,3
	34,0			1,5	0,3
	47,2			1,1	0,2
	15,2			3,5	0,7
	20,2			2,6	0,5
	25,1			2,1	0,4
	25,7			2,0	0,4
5	33,1	87,4	23,0	2,6	0,7
	25,3			3,5	0,9
	22,1			4,0	1,0
	35,9			2,4	0,6
	37,1			2,4	0,6
10	64,6	109,9	32,5	1,7	0,5
50	122,9	159,0	55,3	1,3	0,4
	54,0			2,9	1,0

TABELA F.5 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS do SCS

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	58,6	115,6	35,4	2,0	0,6
	79,2			1,5	0,4
	34,3			3,4	1,0
	34,0			3,4	1,0
	47,2			2,5	0,8
	15,2			7,6	2,3
	20,2			5,7	1,8
	25,1			4,6	1,4
	25,7			4,5	1,4
5	33,1	191,1	77,6	5,8	2,3
	25,3			7,5	3,1
	22,1			8,6	3,5
	35,9			5,3	2,2
	37,1			5,1	2,1
10	64,6	239,3	107,9	3,7	1,7
50	122,9	345,1	179,7	2,8	1,5
	54,0			6,4	3,3

TABELA F.6 – Vazões de pico observadas, vazões de pico simuladas, relação Q_{sim}/Q_{obs} para a estação Porto Vitória (65365000) para o HUS de Clark

TR	Q_{obs}	Q_{sim}		Q_{sim}/Q_{obs}	
		Conservador	Arrojado	Conservador	Arrojado
2	58,6	97,0	28,9	1,7	0,5
	79,2			1,2	0,4
	34,3			2,8	0,8
	34,0			2,8	0,8
	47,2			2,1	0,6
	15,2			6,4	1,9
	20,2			4,8	1,4
	25,1			3,9	1,2
	25,7			3,8	1,1
5	33,1	159,9	64,0	4,8	1,9
	25,3			6,3	2,5
	22,1			7,2	2,9
	35,9			4,5	1,8
	37,1			4,3	1,7
10	64,6	201,2	89,6	3,1	1,4
50	122,9	290,9	151,3	2,4	1,2
	54,0			5,4	2,8